

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba
Institut environmentálního inženýrství

Potlačení nálepů strusky v energetických kotlích přidáváním aditiva do vsázky

Disertační práce

Doktorand:	Ing. Hana Nadkanská
Školitel:	prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.
Studijní program:	Nerostné suroviny
Studijní obor:	Úpravnictví

Ostrava 2016

Abstrakt

Předložená disertační práce se týká možnosti omezení tvorby nálepů strusky v energetických kotlích za pomoci přidávání aditiva do vsázky. Možnosti snížení tvorby nálepů v energetických kotlích byly zkoumány pomocí laboratorních experimentů včetně technologického ověření.

V teoretické části práce jsou popsány kotle, které se používají v energetice. Je zde popsána tvorba popela a chování minerálních látek obsažených v uhlí během spalování. Dále je zde popsán princip struskování a zanášení.

V této práci jsou jako indikátory pro zjištění struskování a zanášení kotlů použity teploty tavitelnosti popela a indexy struskování a zanášení. V další části práce jsou popsány možné fyzikální metody sloužící k odstranění vzniklých nálepů a chemické aditiva omezující jejich tvorbu.

Experimentální část je rozdělena do dvou částí. V laboratorních podmínkách byly stanovovány termoplastické vlastnosti popela dle normy ČSN ISO 540 Uhlí a koks – Stanovení tavitelnosti popela. Pro výpočet indexů struskování a zanášení byl proveden chemický rozbor popela pomocí RTG fluorescence. Dále byla provedena RTG difrakce, RTG fluorescence a analýza SEM/EDAX ze strusky odebrané z kotlů Teplárny Přívoz.

Druhá část se týká provedení výpočtů účinnosti kotlů provozovaných v Teplárně Přívoz pomocí nepřímé metody. Účinnost byla vypočtena pro kotle bez dávkování a s dávkováním aditiva. Z výsledků vyplývá, že použitím daného aditiva dochází ke zvýšení účinnosti kotle zhruba o 1 %.

V práci jsou také porovnány finanční náklady na čištění kotlů s a bez přidání aditiva.

Klíčová slova: struska, struskování, zanášení, granulační kotel, teploty tavitelnosti popela, účinnost kotle

Abstract

This thesis addresses the possibility to reduce slag creation in power furnaces using batch additives. The possibilities to reduce the slag creation in the furnaces were explored by the means of laboratory experiments and technological verification.

Ash melt temperature and indices of slagging and fouling are used in this thesis as indicators of furnaces slagging and fouling.

The experimental part is divided into two sections. The thermoplastic properties of ash were determined in the laboratory environment according to Czech regulation ČSN ISO 540 Uhlí a koks – stanovení tavitelnosti popela (Coal and coke – determination of ash melting). Indices of slagging and fouling were calculated based on chemical analysis of ash using x-ray fluorescence. Further, slag from Teplarna Privoz furnaces was analyzed using x-ray diffraction, x-ray fluorescence and SEM/EDAX analysis. We also performed analysis to determine leachability class, ecotoxicity, and pollutant content in dry slag for the purpose of slag disposal.

The second section calculates the efficiency of Teplarna Privoz furnaces using an indirect method. The efficiency was calculated with and without using additives. The result shows efficiency increase of 1 % can be reached by using additives.

Expenses (with and without additive) for furnace cleaning are also compared in the thesis.

Key words: slag, slagging and fouling, pulverized coal boilers, ash thermoplastic properties, boiler efficiency

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci vypracovala samostatně, podle pokynů školitele, s použitím uvedené literatury, v souladu se směrnicí děkana č. 1/2010 disertační práce a autoreferát a v souladu se Studijním a zkušebním řádem pro studium v doktorských studijních programech Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.

V souladu s §47a zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů souhlasím s publikováním textu své práce na webové stránce HGF VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě

.....

Ing. Hana Nadkanká

Motivace

Motivací pro tuto disertační práci bylo zjistit, zda je možné omezit tvorbu nálepů v energetických kotlích přidáváním aditiva omezující struskování. Předmětem daného výzkumu bylo provedení laboratorních experimentů včetně technologického ověření. Technologické ověření bylo provedeno v Teplárně Přívoz. Účelem práce bylo zjistit, zda dané aditivum je schopno potlačit tvorbu nálepů v energetických kotlích a zda se tento jev pozitivně projeví v provozních podmínkách.

Touto cestou bych chtěla poděkovat Dr. Ing. Daliboru Matýskovi z Institutu geologického inženýrství, Hornicko – geologické fakulty VŠB – TU Ostrava za provedení RTG difrakce a analýzy SEM-EDAX. Dále děkuji Ing. Michalovi Stáňovi Ph.D., z katedry energetiky VŠB-TU Ostrava za odborné rady při výpočtech účinnosti kotle. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat kolektivu pracovníků společnosti Veolia Energie ČR, a.s., Regionu Severní Morava, Závodu Teplárna Přívoz za možnost praktického ověření účinnosti aditiva.

Obsah

1.	Úvod.....	- 1 -
2.	Cíle disertační práce	- 2 -
3.	Dělení energetických kotlů spalující tuhá paliva dle druhu ohniště.....	- 3 -
3.1.	Kotle s roštovým ohništěm	- 3 -
3.2.	Kotle s fluidním ohništěm.....	- 3 -
3.3.	Kotle s práškovým ohništěm.....	- 3 -
3.3.1.	Granulační ohniště	- 4 -
3.3.2.	Výtavná ohniště	- 5 -
4.	Spalování černého uhlí a jeho transformace	- 6 -
4.1.	Chování minerálních látek během spalování	- 7 -
4.1.1.	Tvorba popela	- 8 -
4.1.2.	Minerální transformace	- 9 -
4.1.3.	Transport hmoty a tvorba depozice	- 12 -
4.1.4.	Adheze k povrchu teplosměnných ploch a zpevňování depozice	- 14 -
5.	Popeloviny a popel.....	- 15 -
6.	Struskování a zanášení kotlů.....	- 19 -
6.1.	Struskování (tvorba struskových nánosů).....	- 20 -
6.2.	Zanášení (tvorba popílkových nánosů).....	- 21 -
6.3.	Koroze.....	- 22 -
7.	Indikátory struskování a zanášení.....	- 23 -
7.1.	Termoplastické vlastnosti popela - teploty tavitelnosti popela.....	- 23 -
7.2.	Charakteristické indexy struskování a zanášení	- 25 -
7.2.1.	Teuneho číslo.....	- 25 -
7.2.2.	B/A poměr	- 26 -
7.2.1.	Ukazatele Babcock- Wilcox	- 26 -
7.2.2.	Poměr Fe/Ca	- 27 -
7.2.3.	Součet železa a vápníku.....	- 27 -
7.2.4.	Struskovací faktor R_t	- 27 -
7.2.5.	Součet $Na_2O + K_2O$ (T_a).....	- 28 -
7.2.6.	Viskozita.....	- 28 -
8.	Možnosti omezení struskování granulačních kotlů.....	- 30 -
9.	Aditiva používaná pro omezení struskování.....	- 31 -
9.1.	Rozdělení aditiv	- 31 -
9.2.	Aditivum NALCO 8270	- 34 -
10.	Fyzikální možnosti odstranění vzniklých nánosů.....	- 35 -
10.1.	Metody čištění za provozu kotle	- 35 -
10.1.1.	Parní ofukovače	- 35 -
10.1.2.	Kuličkový déšť	- 36 -
10.1.3.	Akustické čištění	- 37 -
10.1.4.	Vodní ostřiky	- 37 -
10.1.5.	Mechanický oklep	- 38 -
10.2.	Metody čištění po odstavení kotle	- 38 -
10.2.1.	Ruční odstranění	- 38 -
10.2.2.	Řízený výbuch	- 39 -
11.	Teplárna Přívoz (TPV)	- 40 -

11.1.	Popis provozu	- 40 -
11.2.	Dávkování aditiva NALCO 8270	- 42 -
12.	Stanovení účinnosti kotlů	- 45 -
12.1.	Přímá metoda stanovení účinnosti (metoda příkon – výkon)	- 45 -
12.2.	Nepřímá metoda stanovení účinnosti	- 45 -
13.	Experimentální část	- 47 -
13.1.	Laboratorní experimenty	- 47 -
13.1.1.	Termoplastické vlastnosti popela	- 47 -
13.1.2.	Parametry proplásku	- 49 -
13.1.3.	Výpočet charakteristických indexů struskování a zanášení	- 50 -
13.1.4.	RTG difrakce a RTG fluorescence	- 56 -
13.1.5.	Analýza SEM/EDAX	- 63 -
13.1.6.	Stanovení třídy vyluhovatelnosti, ekotoxicity a obsahu škodlivin v sušině strusky	- 69 -
13.2.	Ověření v provozu	- 70 -
13.2.1.	Porovnání čištění kotlů	- 70 -
13.2.2.	Výpočet účinnosti kotlů	- 72 -
14.	Závěr	- 77 -
Soupis bibliografických citací		
Publikace autora		
Seznam příloh		

Seznam obrázků

Obrázek 1	Proces tvorby popílku.....	- 9 -
Obrázek 2	Chování železa	- 11 -
Obrázek 3	Mechanismus inerciálního zaklínění	- 13 -
Obrázek 4	Ternární diagram $\text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$	- 17 -
Obrázek 5	Tvorba struskové částice	- 21 -
Obrázek 6	Oblasti tvorby struskových a popílkových nánosů v granulačním kotli..	- 22 -
Obrázek 7	Vzorek v analyzátoru.....	- 23 -
Obrázek 8	Charakteristické tvary zkušebního tělíska ve tvaru kužele.....	- 24 -
Obrázek 9	Rozdělení strusek dle reologických vlastností.....	- 29 -
Obrázek 10	Schéma kuličkového deště.....	- 36 -
Obrázek 11	Schéma vodních ostříků.....	- 38 -
Obrázek 12	Ruční odstranění vzniklé strusky v TPV	- 39 -
Obrázek 13	Drtič typu „Martin“	- 42 -
Obrázek 14	Dávkování aditiva NALCO 8270	- 43 -
Obrázek 15	Barel s čerpadlem	- 44 -
Obrázek 16	Ternární diagram $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (pokus 1)	- 53 -
Obrázek 17	Ternární diagram $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (pokus 2).....	- 56 -
Obrázek 18	Struska 1	- 58 -
Obrázek 19	Struska 2	- 59 -
Obrázek 20	Struska 3	- 60 -
Obrázek 21	Struska 4	- 60 -
Obrázek 22	Struska 5	- 61 -
Obrázek 23	RTG difrakce propláستku.	- 63 -
Obrázek 24	Zvětšení strusky1.....	- 64 -
Obrázek 25	Zvětšení strusky 1.....	- 64 -
Obrázek 26	Zvětšení strusky 2.....	- 65 -
Obrázek 27	Zvětšení strusky 2.....	- 65 -
Obrázek 28	Zvětšení strusky 3.....	- 66 -
Obrázek 29	Zvětšení strusky 3.....	- 66 -
Obrázek 30	Zvětšení strusky 4.....	- 67 -
Obrázek 31	Zvětšení strusky 4.....	- 67 -
Obrázek 32	Zvětšení strusky 5.....	- 68 -
Obrázek 33	Zvětšení strusky 5.....	- 68 -

Seznam tabulek

Tabulka 1 Minerály vyskytující se v uhlí.....	- 7 -
Tabulka 2 Náchylnost kotlů k zastruskování a zanášení.....	- 27 -
Tabulka 3 Množství dávkovaného aditiva na 2 kg uhlí.	- 48 -
Tabulka 4 Výsledné hodnoty termoplastických vlastností popela.....	- 48 -
Tabulka 5 Množství dávkovaného aditiva na 2 kg uhlí.	- 49 -
Tabulka 6 Výsledné hodnoty termoplastických vlastností popela.....	- 49 -
Tabulka 7 Parametry ostravského propláستku.	- 49 -
Tabulka 8 Chemický rozbor popela (první pokus).	- 50 -
Tabulka 9 Hodnoty indexů struskování a zanášení prvního pokusu.....	- 51 -
Tabulka 10 Chemický rozbor popela (druhý pokus).....	- 54 -
Tabulka 11 Hodnoty indexů struskování a zanášení druhého pokusu.....	- 54 -
Tabulka 12 Rozdělení vstupního materiálu pro vznik strusky.....	- 57 -
Tabulka 13 Chemické složení strusky 1.	- 58 -
Tabulka 14 Chemické složení strusky 2.	- 59 -
Tabulka 15 Chemické složení strusky 3.	- 60 -
Tabulka 16 Chemické složení strusky 4.	- 61 -
Tabulka 17 Chemické složení strusky 5.	- 61 -
Tabulka 18 Výsledky RTG difrakce.	- 62 -
Tabulka 19 Analýza strusky 1.....	- 64 -
Tabulka 20 Analýza strusky 1.....	- 64 -
Tabulka 21 Analýza strusky 2.....	- 65 -
Tabulka 22 Analýza strusky 2.....	- 65 -
Tabulka 23 Analýza strusky 3.....	- 66 -
Tabulka 24 Analýza strusky 3.....	- 66 -
Tabulka 25 Analýza strusky 4.....	- 67 -
Tabulka 26 Analýza strusky 4.....	- 67 -
Tabulka 27 Analýza strusky 5.....	- 68 -
Tabulka 28 Analýza strusky 5.....	- 68 -
Tabulka 29 Porovnání čištění kotlů.....	- 71 -
Tabulka 30 Vstupní údaje pro výpočet účinnosti.....	- 73 -
Tabulka 31 Základní údaje o propláستku a KP.....	- 74 -
Tabulka 32 Hmotnostní toky a vypočtené ztráty.....	- 75 -

Seznam zkratek

A^r	popel v původním stavu
A_t	atomové procenta
C^r	veškerý uhlík v původním stavu
H^r	veškerý vodík v původním stavu
KP	koksárenský plyn
η	účinnost [%]
N^r	veškerý dusík v původním stavu
O^r	původní stanovený kyslík
Q_i^r	výhřevnost původní
Q_s^{daf}	spalné teplo v hořlavině
S^r	veškerá síra v původním stavu
TTP	teploty tavitelnosti popela
TPV	Teplárna Přívoz
W^r	veškerá voda
W_t^r	veškerá voda původní
W_t	hmotnostní procenta

Cizojazyčné zkratky

DT	deformation temperatura (teplota deformace)
FT	flow temperature (teplota měknutí)
HT	hemisphere temperature (teplota tání)
ST	sphere temperature (teplota tečení)

1. Úvod

Uhlí obsahuje kromě hořlaviny popelovinu a vodu. Minerály obsažené v uhlí v přírodním stavu jsou označovány jako popeloviny. Spálením uhlí s popelovinou vzniká popel. Pokud je spalovací teplota vyšší, než teplota tavení popeloviny dochází ke vzniku strusky. Popel na rozdíl od strusky je směsí minerálů, kdežto struska je jejich taveninou [1,2].

Strusky, tvořící se na stěnách kotlů a granulačním roštu vedou k mnoha negativním účinkům. Dochází k zanášení spalinových cest, které mohou snížit výkon kotlů, snížit přestup tepla nebo může dojít k mechanickému namáhání trubek. Tyto negativní jevy mohou vést až poruchám tlakového celku a k neplánovanému odstavení kotlů. Pod vzniklou struskou může také docházet ke korozi. Rozhodující vliv na tvorbu strusky má nejen složení popelovin, termoplastické vlastnosti popela, ale také obsah železa. S větším obsahem železa se snižuje teplota plastické deformace a je tedy vyšší náchylnost k tvorbě strusky [1].

Problematikou závislosti termoplastických vlastností popela na jeho chemickém složení se teoreticky zabývala již řada studií [3, 4, 5, 6, 7]. I když jsou známé principy tvorby nálepů výhřevných ploch kotlů, v praxi tomuto jevu nelze jednoduše zabránit. Například v běžné praxi nelze trvale zajistit vhodné uhlí pro daný typ kotle, homogenitu, stejné termoplastické vlastnosti popela. Vždy je nutno respektovat lokalitu těžby, podmínky těžby, úpravu uhlí a skutečné složení popelovin.

V souvislosti s rozvojem vědeckých poznatků a komerční výrobou chemických přípravků bude provedena teoretická a praktická možnost snížení struskování použitím chemického přípravku pod označením NALCO 8270. Tento přípravek je jednoduchým způsobem nastříkáván na dopravníkový pás.

2. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je možnost technologického ověření snížení struskování práškového granulačního kotle, které bude doplněno o laboratorní zkoušky. Laboratorní zkoušky budou orientovány na vysvětlení teoretické podstaty a principu navržené metody.

Pro dosažení cíle budou provedeny:

- laboratorní rozbor pro zjištění termoplastických vlastností popela,
- výpočty indexů pro náchylnost ke struskování použitého ostravského proplásku,
- ze získaných výsledků bude porovnána účinnost kotle (úspora nákladů na proplástek), čištění kotle a počet odstávek.

3. Dělení energetických kotlů spalující tuhá paliva dle druhu ohniště

Kotel je zařízení, ve kterém dochází k transformaci chemické energie fosilních paliv (uhlí, zemní plyn, ropa) nebo energie z alternativních paliv (biomasa) na energii tepelnou. Při spalování tuhých paliv se běžně využívají ohniště se spalováním na roštu (roštové ohniště), ve fluidní vrstvě (fluidní ohniště), ve vzosu (prášková ohniště) [8].

3.1. Kotle s roštovým ohništěm

Roštová ohniště jsou nejstarším typem ohnišť [8]. Tento typ je vhodný pro spalování kusovitých paliv v pevné vrstvě. Palivo v roštových ohništích leží na roštu ve vrstvě, jejíž tloušťka je závislá na výkonu ohniště, prodyšnosti vrstvy pro spalovací vzduch [9].

V současné době se tyto kotle na spalování uhlí téměř nestaví, většina nových kotlů je určena pro spalování biomasy. Uhelné kotle jsou dnes zpravidla menších výkonů a převážně se využívají pro lokální topeniště. Z hlediska jejich funkce a způsobu obsluhy je lze rozdělit do dvou skupin (s pevným roštem a mechanickým roštem). Maximální teploty v ohništi roštových kotlů jsou pro uhlí asi 1350–1450 °C podle druhu uhlí, pro biomasu pak 1000–1300 °C [10, 11, 12].

3.2. Kotle s fluidním ohništěm

Možnost spalování uhlí ve fluidní vrstvě je znám již od dvacátých let minulého století. Fluidizace je děj, v němž jsou pevné látky udržovány ve fluidní vrstvě ve vzosu proudem vzduchu a spalin. Fluidní vrstva tvoří disperzní systém. Kotle lze podle fluidní vrstvy rozdělit na kotle se stacionární fluidní vrstvou a cirkulující fluidní vrstvou. Teplota ve fluidní vrstvě bývá mezi 800- 900 °C [11, 12, 13].

3.3. Kotle s práškovým ohništěm

Tento typ ohniště patří mezi nejrozšířenější technologii v průmyslové energetice. Tyto kotle spalují rozemleté uhlí (uhelný prášek) s granulometrií kolem 0,1 mm [11]. Tento

prášek je přiváděn do spalovací komory pneumaticky. Jako nosné médium je používán vzduch, spaliny nebo jejich směs. Při spalování uhelného prášku dochází ke vzniku popílku a strusky. Popílek je unášen z ohniště spalinami. Vznikající struska vypadává gravitací ze spalovací komory do vhodného vynašeče strusky nebo vytéká z ohniště (výtavná ohniště). Prášková ohniště lze tedy dělit na granulační ohniště a výtavná ohniště [11, 12, 13].

3.3.1. Granulační ohniště

Kotle s granulačním ohništěm mají zpravidla tvar vysokého a štíhlého kvádry, který je ve spodní části zakončen granulační výsypkou. Charakteristickým znakem pro tyto ohniště na rozdíl od výtavných je nižší teplota plamene. Obvykle nebývají průměrné teploty v jádru plamene vyšší než 1 200 °C až 1 500 °C. U těchto ohnišť je vhodné, aby teplota v ohništi nepřekročila v blízkosti teplosměnných ploch tlakového celku teplotu tavení popelovin. Požadované teploty v ohništi se zajišťují konstrukcí kotle a způsobem přívodu paliva do spalovací komory, případně dalšími úpravami hořákových oblastí spalovacích komor. Spalovací teplotu výrazně ovlivňuje i teplota spalovacího vzduchu. V důsledku spalovací teploty ve spalovací komoře jsou popeloviny odváděny ve formě strusky (15-30 %) a ve formě popílku (70 – 85 %). Popílek je tvořen jemnými částicemi popeloviny prošlé spalovacím procesem se zbytky spalitelných látek v různém stupni vyhoření. Přimísené pomleté inertní částice k uhlí mají ostrohranný charakter. Zbytky popelovin přimísené k palivu prošly většinou tavným procesem a mají kulový tvar. Popílek vzniklý při spalování způsobuje zanášení dodatečných tahů kotlů. Při spalování sirnatých uhlí dochází u granulačních ohnišť k tvorbě SO_2 a SO_3 ve spalinách. Proto musí být teplota spalin na výstupu z kotle nad rosným bodem spalin. Příčinou struskování granulačních ohnišť jsou nejen vlastnosti paliva a jejich popelovin, ale také i vysoká teplotní zatížení spalovacího prostoru a aerodynamika ohniště. Tyto jevy vedou k nevyrovnanému průběhu teplotních a rychlostních polí v ohništi jak po výšce, tak po šířce. Toto způsobuje místně vysoké teploty popelovin ve spalinách a dochází k jejich shlukování a depozici na stěny [11, 12, 13, 14].

3.3.2. Výtavná ohniště

Výtavné ohniště pracuje při teplotách přesahujících teplotu měknutí, tavení a tečení popela. Popelovina zachycená v ohništi se v případě výtavných ohnišť odvádí ve formě tekuté strusky. V místě odtoku musí mít teplotu vyšší než je její teplota tuhnutí. Vzhledem k tomu, že bod tavení strusek se pohybuje okolo 1 100 až 1 600 °C musí být ve spodní části tavícího prostoru teplota 1 500 až 1 700 °C. Struska je odváděna ze skloněného dna do nádrže naplněné vodou. Ve vodě je struska prudce zchlazena a dojde k jejímu rozpadu na struskový písek, který je mechanicky či hydraulicky dopravován na uložisko [11, 12].

Na rozdíl od popílku granulačních ohnišť je popílek výtavných ohnišť mnohem jemnější a způsobuje na dodatkových plochách více ulpívající nánosy, které se obtížně odstraňují.

4. Spalování černého uhlí a jeho transformace

Pevná paliva, zejména hnědá a černá uhlí jsou nejčastějším zdrojem pro výrobu energie, zejména v teplárnách a elektrárnách [15]. V této kapitole jsou charakterizovány minerály vyskytující se v uhlí a chování některých minerálů během spalování.

Černé uhlí můžeme definovat jako tuhé hořlavé sedimentární horniny, které jsou tvořené z rostlinné hmoty. Z petrologického hlediska lze uhlí dělit na méně prouhelněné typy (optotypy) a více prouhelněné typy (metatypy). Černé uhlí bývá karbonského a permského stáří. U nás se v minulosti těžily černá uhlí v kladensko-rakovnické pánvi, plzeňské pánvi, vnitrosudetské pánvi, v rosicko-oslavské oblasti a v ostravsko-karvinském revíru [16]. V současné době se u nás černá uhlí těží pouze v karvinské oblasti a v Dole Paskov u Frýdku Místku.

Původ anorganické složky, která se nachází v uhlí, může být klasifikována jako:

- anorganické prvky, které pocházejí z rostlin,
- detritus, který sedimentoval při tvoření rašeliny,
- epigenetické minerály, které se tvořily v průběhu nebo po sedimentaci rašeliny.

Minerály vyskytující se v uhlí můžeme rozdělit na hlavní, vedlejší a stopové minerály. Minerály, které se běžně vyskytují v uhlí, jsou uvedeny v tabulce 1 [17].

Tabulka 1 Minerály vyskytující se v uhlí [17].

hlavní minerály	silikáty	jílové minerály	kaolinit	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
			illit	$(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$
			smíšená vrstva	-
			chlorit	$(\text{MgFeAl})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
vedlejší minerály		uhličitany	křemen	SiO_2
			kalcit	CaCO_3
			dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
			ankerit	$\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{CO}_3$
			syderit	FeCO_3
		sulfáty	szomolnokit	$\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
			sádrovec	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
			bassanit	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
			anhydrid	CaSO_4
			jarosit	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
		živce	plagioklas	$(\text{NaCa})\text{Al}(\text{AlSi})\text{Si}_2\text{O}_8$
			ortoklas	KAlSi_3O_8
		sulfidy	galenit	PbS
			pyrhotin	FeS

Převážná většina minerálů v uhlí jsou jílové minerály. Množství jílových minerálů v uhlí se mění v širokém rozmezí (60 až 89 %). Nejčastěji se v uhlí vyskytuje illit a montmorillonit. Kaolinit se v uhlí vyskytuje v malém množství. Kaolinity jsou v podstatě tvořeny pouze kyselými oxidy, zatímco illity a montmorillonity obsahují prvky alkalických zemin a alkalických skupin. Kromě jílových hornin obsahuje uhlí menší množství klastických sedimentů jako je písek složený s křemene a živce [17,18].

Z aluminosilikátových minerálů se v uhlí vyskytují kromě jílových minerálů také živce. Živce jsou stabilní proti zvětrávání a změně jejich struktury. Nicméně v uhlí je vždy méně živců než jílu, a proto lze jejich účinek na strusky zanedbat [17,18].

4.1. Chování minerálních látek během spalování

Minerály a další anorganické složky vyskytující se v uhlí reagují různými způsoby při jeho spalování. Lze očekávat, že každý minerál bude podroben řadě reakcí při různých teplotách a v různých atmosférách a bude tvořit řadu minerálních látek, které se budou

nacházet v nespálených zbytcích (struska, popílek). Různé fáze na sebe také mohou vzájemně působit, i když tento proces může být omezen spalovacím procesem. Vysokoteplotní procesy zahrnují transformaci minerální hmoty na popel (popílek) a strusku. Produkty těchto vysokoteplotních procesů mohou v kotli reagovat s komponenty v kotli a způsobovat korozi [20].

Depozice popela na teplosměnných plochách je velmi složitý chemický a fyzikální proces, který je složen ze čtyř základních procesů. Prvním procesem je tvorba popela. Druhý krok spočívá v transformaci minerálních částic. Třetím krokem je transport popela a tvorba depozice částic popela na povrch teplosměnných ploch. Čtvrtým krokem je adheze k povrchu teplosměnných ploch a zpevňování depozice [18, 20, 21].

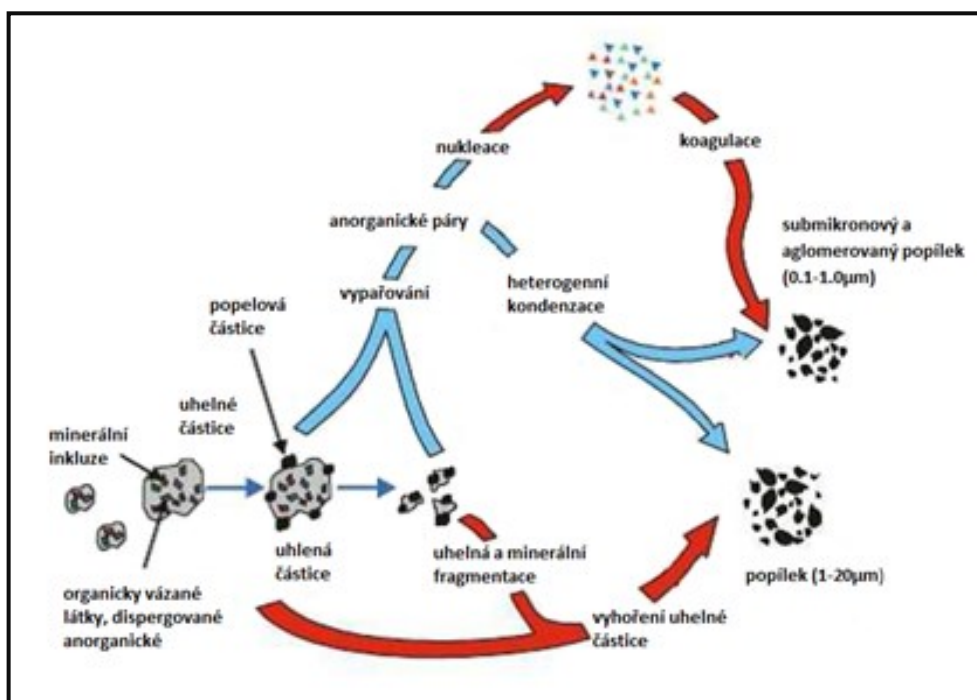
4.1.1. Tvorba popela

V práškových kotlích je obvykle spalováno uhlí s průměrnou velikostí 75 μ m, kde uhlí je do spalovací komory transportováno vzduchem. Po dopravení uhlí do kotle, dochází k jeho rychlému zahřívání. Tento rychlý ohřev je způsoben radiací a smíšením paliva s horkými spaliny, které mohou dosahovat vysokých teplot. Dále dochází k poklesu těkavých látek v uhelném prášku, uvolnění organických plynů, jejich hoření a následnému hoření vzniklého polokoksu [18, 20, 21].

V průběhu ztráty těkavých látek a hoření vzniklého polokoksu dochází k uvolnění iontově nebo organicky vázaných anorganických látek (K, Ca, O, S a Cl) a tvorbě anorganických par. V závislosti jakým způsobem jsou uvolněny a během které fáze spalování, může být část anorganických par zachycena v minerálních inkluzích [18, 20, 21].

Zbývající nevypařené minerální inkluze procházejí řadou fyzikálních a chemických procesů, jako jsou fázové přeměny, fragmentace, tání a shlukování minerálních látek. Stupeň minerální transformace a množství vytvořené roztavené fáze závisí na několika faktorech. Mezi tyto faktory patří například typ atmosféry (oxidační, redukční), doba zdržení minerálních částí ve vysokoteplotních oblastech, chemické složení minerálů.

Proces spalování uhlí vede k tvorbě popílku a rychlost jeho tvorby je menší než 3 s. Na obrázku 1 je znázorněn proces tvorby popílku [18, 20, 21].



Obrázek 1 Proces tvorby popílku [20, 21].

4.1.2. Minerální transformace

Tepelné procesy, které probíhají při transformaci, mohou být rozděleny do čtyř skupin [22]:

- rozklad minerálů na jednoduché sloučeniny,
- ztráty těkavosti (sublimace) jednotlivých komponentů uhlí a vytváření aerosolů,
- tvorba nových minerálních látek ve spalovací zóně,
- tavení a zkapalňování nehořlavých částí.

Mezi anorganické látky, které mají největší vliv na tvorbu strusky, patří železo, vápník, draslík a aluminosilikáty. Při spalování uhlí dochází k uvolňování prvků alkalických zemin (Ca, Mg) a uvolňování alkalických kovů (Na, K) což vede ke zvyšování tvorby nálepů.

Železo se v uhlí může vyskytovat v různých formách například jako sulfidy, uhličitany nebo oxidy. Oxidy kovů železa mají velký vliv na viskozitu a termoplastické vlastnosti, a tím mají také vliv na tvorbu strusky [18, 23].

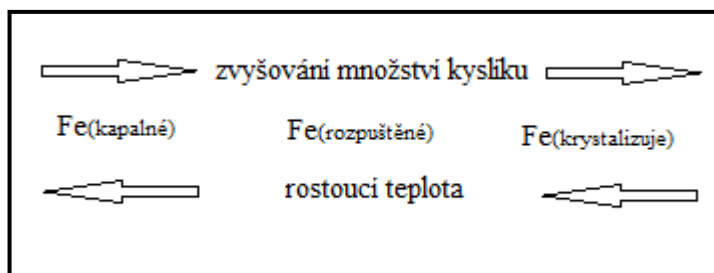
Oxidy kovů železa v popelovinách představují tavidla, která mohou být citlivá k atmosféře. V oxidační atmosféře se velká část železa vyskytuje ve formě Fe^{3+} , kde Fe_2O_3 má teplotu tání $1565\text{ }^\circ\text{C}$. V redukčních podmínkách se většina železa vyskytuje ve formě Fe^{2+} , kde FeO má teplotu tání $1420\text{ }^\circ\text{C}$ [18, 23, 24].

V redukční nebo poloredukční atmosféře za vysokých teplot je železo ve formě FeO silným tavidlem. Efekt FeO na viskozitu je srovnatelný s CaO . V oxidační atmosféře se železité ionty mohou chovat jako zesíťované silikáty, které se chovají podobně jako Al_2O_3 [18, 20, 23, 24].

V závislosti na charakteru atmosféry v kotli dochází tedy k rozkladu pyritu a sideritu za vzniku oxidu železa jako je hematit, magnetit a maghemit (gamma hematit). Železo v uhlí může také reagovat za vzniku řady dalších minerálů včetně spinelu, magnezioferitu, srebrodolskitu, brownmilleritu [18, 20, 23, 24].

Autoři příspěvku [25] zjistili že, různé oxidační stavy železa (Fe^{2+} , Fe^{3+}) jsou dominantní pro chování popela a jeho slinování za různých atmosférických podmínek kotle. Prokázali, že minerály jako je wustit (FeO), almandin ($3\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$) a fayalit ($\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)$) ovlivňují počáteční spékání popela za redukčních podmínek v rozmezí teplot $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ až $1\,100\text{ }^\circ\text{C}$.

Viskozita strusky se také zvýší v důsledku krystalizace spinelů železa a železa obsahující silikáty. V redukční atmosféře za vysokých teplot se železo může oddělit jako tekutý kov většinou jako slitina s křemíkem [23]. Chování železa může být shrnuto (viz obrázek 2).



Obrázek 2 Chování železa [23].

Nejrozšířenější formou železa je pyrit (FeS_2). Pyrit se může v popelovinách vyskytovat jako vázaný nebo jako příměs. Bylo zjištěno, že pyrit se rozkládá při teplotě 300 °C a vyš. V závislost na charakteru atmosféry v kotli dochází k rozkladu pyritu a sideritu za vzniku oxidu železa jako je hematit, magnetit a maghemit (gama hematit) [18, 23, 24, 26].

Vápenec se rozkládá na CaO a CO_2 v rozsahu teplot 810-1100 °C. Vzhledem k tomu, že CaO je tavidlo, dochází v jeho přítomnosti ke snížení teploty tání. Tvorba CO_2 je důvodem fragmentace kalcitu, což je důležitý faktor, který ovlivňuje množství a rychlost ukládání síranu vápenatého [27].

Vápenec může reagovat s vodou za vzniku portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Dále může vápenec reagovat s aluminosilikáty při zvýšené teplotě za vzniku minerálu jako je gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) a anortit. Dolomit se rozloží na vápenec a dále na periklas (MgO) [20, 23].

Křemen je vzhledem ke své teplotě tání (cca 1800 °C) ve spalovacích procesech v podstatě nereaktivní, zejména v případě vyskytuje-li se v monominerální formě. Při tavení křemene může být vytvořen tridymit (1670 °C) a kristobalit (1728 °C). Vzhledem k tomu, že tavení křemene probíhá pomalu, zůstává jeho velká část nezměněna [20, 23].

Kaolinit ztrácí při teplotě 500 °C OH skupinu a tvoří v podstatě amorfni minerál metakaolin. Metakaolin prochází fázovými změnami za vzniku gama-oxidu hlinitého, mullitu a kristobalitu při teplotách 950 až 1 000 °C. Tyto produkty zůstávají v pevné fázi do 1 600 °C. Illit a smektit vzniklý ze spinelu a mullitu se (950 až 1050 °C) roztaví a tvoří skelné komponenty při teplotě 1200 až 1350 °C a způsobují poměrně nízkou teplotu tání [20, 23].

Autoři příspěvku [28] rozdělili rozklad *illitu* do dvou reakcí spojené s dehydroxylací. První reakce illit \rightarrow semimetaillit začíná asi u 277 °C, zatímco druhá semimetaillit \rightarrow metaillit kolem 627 °C.

Při teplotách nad 1127 °C ztrácí illit krystalickou strukturu a stává se tekutým [29].

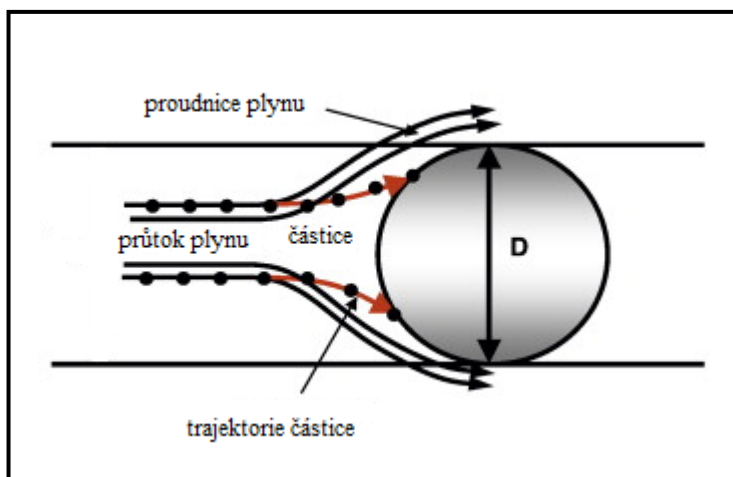
4.1.3. Transport hmoty a tvorba depozice

Existuje pět procesů, které umožňují zachycení částic na povrchu teplosměnných ploch. Mezi tyto procesy patří inerciální zaklínění, konvektivní difúze, termoforéza, elektroforéza a gravitační vliv [30, 31].

Transport částic velikosti menší než 1 μm se až do blízkosti povrchu trubek děje turbulentní difúzí. O dalším chování částic pak rozhodují poměry v mezní vrstvě a velikost částic. Nejjemnější částice o velikosti menší než 0,5 μm jsou v mezní vrstvě ovládána molekulární a Brownovou difúzí [14].

Inerciální zaklínění. Tento proces se týká pouze částic větších než 10 μm a vede ke vzniku hrubé granulované depozice. Větší částice nemají dostatečnou sílu k překonání odporu okolních proudnic plynu, odchylují se a vnikají do mezní vrstvy. Pokud jsou tyto částice lepkavé či roztavené mohou způsobovat shlukování [22, 30].

Dle autorů příspěvku [32] je pravděpodobné, že v kotlích se větší částice zachytí na náběžné straně teplosměnných ploch. Pro válcové trubky v příčném proudění je úhel zaklínění 0° na náběžné straně, 90° na trubce a na odtokové straně 180°. Na obrázku 3 je znázorněn mechanismus inerciálního zaklínění.



Obrázek 3 Mechanismus inerciálního zaklínění [22].

Konvektivní difúze. Pomocí difúze jsou transportovány malé částice (menší než $1\ \mu\text{m}$) proudem plynu, který je obohacen o další částice, které vytékaly v plameni. Částice jsou zachyceny v konvekčních proudech a jsou transportovány na povrch trubek [30, 33].

Termoforéza. V tomto případě se částice šíří v závislosti na různém teplotním gradientu, zejména je-li teplota povrchu trubky nižší než teplota plynu. Částice (menší než $10\ \mu\text{m}$) se pohybují v teplotním spádu ve směru klesající teploty. V oblasti vyšší teploty mají molekuly větší kinetickou energii, takže při nárazu na povrch částice z této strany udělují částici větší impuls než molekuly, které do ní narážejí z opačné, chladnější strany [30].

Termoforéza je významná v oblastech vysokých teplot tedy v sálavých částech kotle.

Termoforéza představuje důležitý jev v počáteční fázi tvorby depozice, kdy povrchová teplota trubek je okolo $400\ ^\circ\text{C}$ a průměrná teplota plamene je vyšší než $1400\ ^\circ\text{C}$. S rostoucí vrstvou vytvořené depozice dochází k snížení účinku ukládání depozice pomocí termoforézy z důvodu nárůstu povrchové teploty vzniklé depozice [33].

Elektroforéza. Částice jsou přitahovány na povrch trubky pomocí elektrostatických sil. Na povrch trubky jsou přitahovány částice s opačným elektrickým nábojem [30].

Gravitační vliv - k tomuto jevu dochází, když rychlost plynu není dostatečně vysoká, aby podpořila částice ve vznosu [30].

4.1.4. Adheze k povrchu teplosměnných ploch a zpevňování depozice

Adheze může nastat buď pomocí van der Waalsovy síly, nebo prostřednictvím lepivosti roztavených částic na povrch. Plynné anorganické sloučeniny jako jsou např. alkalické soli, mohou difundovat k povrchu a kondenzátu přímo na chladnějším povrchu. To vede ke vzniku lepkavé vrstvy usazenin, které pak urychlují akumulaci jiných částic na povrch trubek [30, 31].

5. Popeloviny a popel

Popeloviny mají v uhlí velký vliv na provoz kotle a jeho hospodárnost. Popelovina je směs různě chemicky vázaných minerálů. Popeloviny lze rozdělit na syngenetické (primární) a epigenetické (sekundární). Primární popeloviny pocházejí z anorganických složek vegetace, ze které uhlí vzniklo. Sekundární popeloviny vznikly z minerálů vniklých do usazenin po jejich vytvoření naplavením apod. [2, 34, 35].

Kromě syngenetických a epigenetických popelovin lze rozlišit ještě vnější popeloviny. Vnější popeloviny představují hlušiny z nadloží a podloží, které se do uhlí dostanou při těžbě uhlí [2, 34, 35].

Složení popelovin je proto velmi různorodé. Vzhledem k tomu, že syngenetické popeloviny černých uhlí se liší jen málo, rozhodující vliv na jejich složení mají epigenetické a vnější popeloviny [2, 34, 35].

V primárních popelovinách převládají zejména prvky draslík, sodík, vápník, hořčík a železo. Sekundární popeloviny jsou zastoupeny především jílovými minerály a křemenem. Hlavními prvky těchto popelovin jsou křemík, hliník a titan. Prvky v popelovinách nejsou kvalitativně a kvantitativně ve sloji rozšířeny laterálně ani vertikálně [36].

Uhlí, které má nízký obsah popela ($< 5\%$) má v popelu vysoké obsahy oxidů prvků primárních popelovin (K_2O , Na_2O , MgO , CaO , Fe_2O_3). V případě rostoucího obsahu popela se zvyšuje podíl SiO_2 a Al_2O_3 [36].

Popeloviny se při spalování v provozních podmínkách mění na tzv. tuhé zbytky (struska, škvára, popílek). Během zahřívání mění popeloviny fyzikální a chemické vlastnosti. Nejdříve je u popelovin odstraněna hydratovaná voda, dále dochází k rozkladu minerálů. V konečném stádiu tvoří popeloviny roztavenou směs původních minerálů a různých eutektik a prvků. Popeloviny mají po tomto procesu odlišné některé fyzikální a chemické vlastnosti od původní minerální substance a působí na různé části spalovacího zařízení.

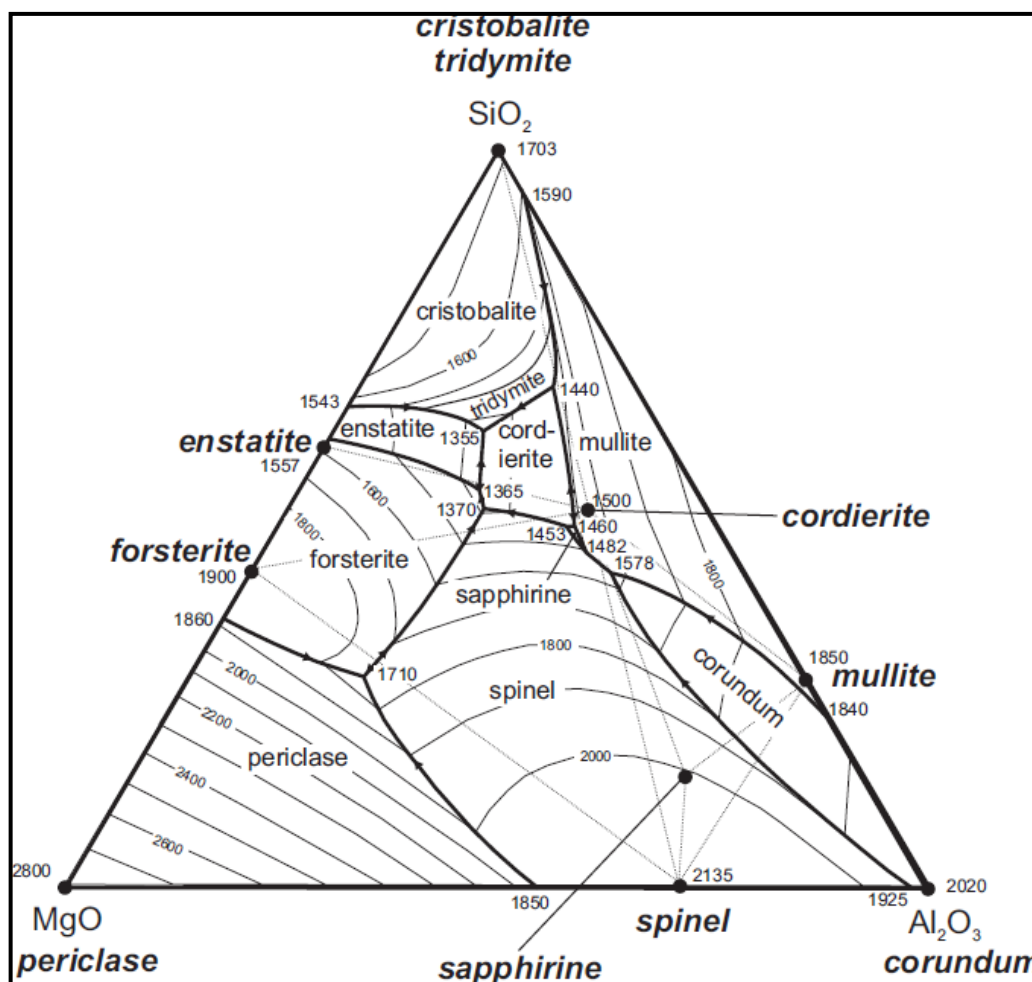
V plameni se popeloviny v uhlí mění v taveninu, jejíž základní částí je tekuté struskové sklo. V případě, že teplota v ohništi není dostatečná k roztavení popelovin, dochází pouze k jejich rozkladu na tuhé a plynné složky popř. k přechodu do amorfního stavu.

Roztavená směs minerálních částic se poté nalepuje na plochy, s nimiž se dostává do styku, dále dochází ke korozi v důsledku chemického působení vzniklých nánosů. Mechanickým působením způsobí usazené částice erozi. Chování popelovin při vysokých teplotách charakterizují termoplastické vlastnosti popela [2, 14, 34, 35].

Při spalování v laboratorních podmínkách se popeloviny mění na popel. Chemické složení popela se stanovuje dle normy ČSN ISO 441358 Tuhá paliva - Stanovení složení popela. Při stanovení chemického složení popela se doporučuje stanovit obsah SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 . Složení popela bývá udáváno v procentech [2, 34, 37, 38].

Z chemického složení popela lze určovat další fyzikální a chemické vlastnosti popela například náchylnost ke struskování a zanášení (viz kapitola 6).

Složení popela je možné zakreslit do ternárního diagramu (obrázek 4). Diagram umožňuje na základě složení popela odhadnout eutektickou teplotu [39].



Obrázek 4 Ternární diagram $\text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ [40].

Chemické složení popela podává pouze orientační představu o složení popelovin, protože neposkytuje žádnou informaci o jejich mineralogickém složení. Například z obsahu SiO_2 v popelu nelze určit, zda se křemík v popelovině vyskytuje jako křemen (písek) nebo křemičitan (jíl) [34, 35].

Chemické složení popela je využíváno pro hodnocení vlivů složek popela na technologické procesy nejen v energetice ale i v hutnictví, stavebnictví atd. [38].

Složky popela lze v závislosti na jejich tavitelnosti rozdělit do tří skupin [41].

Do první skupiny patří sloučeniny s vysokou teplotou tavitelnosti. Mezi tyto složky patří například SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO . Čisté oxidy mají teplotu tavitelnosti v rozmezí $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto složky se netaví a udržují si svou strukturu.

Do druhé skupiny se řadí sloučeniny středně tavitelné například Na_2SiO_3 , K_2SO_4 , FeS , které mají teplotu tavitelnosti v rozsahu $900\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto složky tvoří lepkavou vrstvu na povrchu stěny a způsobují struskování.

Poslední skupinu tvoří složky s nízkou teplotou tání. Do této skupiny patří zejména chloridy a sulfidy alkalických kovů například NaCl , Na_2SO_4 , CaCl_2 , MgCl_2 . Tyto složky mají teplotu tání v rozmezí 700 až $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6. Struskování a zanášení kotlů

V této kapitole je popsán rozdíl mezi struskováním a zanášením kotle.

Spalováním uhlí dochází ke vzniku popela a k tvorbě nánosů v kotli. Nánosy vznikají zejména, je-li spalováno uhlí s obsahem bitumenu, které je klasifikováno jako uhlí s vysokým potenciálem k zanášení. Toto uhlí je nejčastěji používané v průmyslu. Podle způsobu vzniku rozdělujeme nánosy na struskové a popílkové [34, 35, 95].

Podle struktury a způsobu vzniku můžeme nánosy dále dělit na dva základní typy, a to na slinuté nánosy a stmelené nánosy [34, 35, 95].

Slinuté nánosy mohou být tvořeny přímo, tj. zachycováním prachových částic v kapalném či plastickém stavu a jejich slepováním při nárazu na stěnu. Nepřímo tvořené slinuté nánosy vznikají z nánosu původně jen stmeleného. Vnější vrstva nánosu se sline po zvýšení povrchové teploty nánosu nad teplotu měknutí resp. tavení částic [34, 95].

Stmelené nánosy jsou charakteristické zejména pro přehříváky a představují tvrdé nánosy s vrstevnatou strukturou. Tyto nánosy vznikají složitým procesem chemických přeměn v tvořící se vrstvičce. Stavebním materiálem jsou částice struskového skla, které jsou vázány komplexním pojivem, které tvoří sírany K, Na, Fe, Al, silikáty nebo komplexní fosfáty (Ca, Mg, K, Na). Tvorba nánosů má dvě etapy. V první etapě se na čisté trubce teplosměnné plochy zachytí kapalně a tuhé aerosoly jako pojivo. Na straně trubky mohou plynné částice kondenzovat a dochází ke vzniku základní vrstvy reagující s dalšími produkty přeměny popelovin a také s SO_3 a SO_2 . Tímto způsobem se na povrchu trubky vytvoří tekutý film, měkká lepkavá vrstva směsi různých komplexních síranů, fosfátů a silikátů. V druhé etapě přejímají funkci pojiva a postupně dochází ke stmelování zachycujících se struskových prachů a aerosolů v kompaktní vrstvu [34, 35].

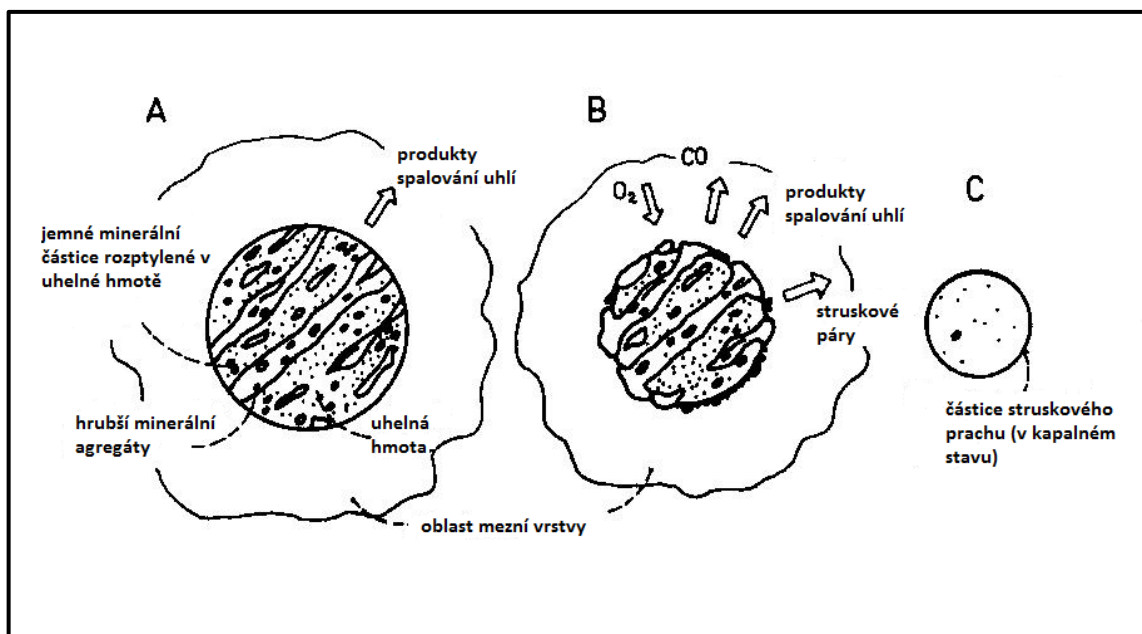
Tyto strusky jsou problematické z hlediska možnosti zablokování cesty průtoku spalín v dodatkovém (druhém) tahu kotle [34, 52].

6.1. Struskování (tvorba struskových nánosů)

Struskování probíhá v těch částech kotle, kde je dominantní přenos tepla sáláním. Struskování je výsledkem reakcí, které probíhají při zahřátí popelovin nad kritickou teplotu (teplota tání) a dochází k vytvoření kapalné fáze. Na tvorbě strusky se také podílí provozní podmínky kotle [59, 60].

Ve většině granulačních kotlů mírné nánosy strusky na teplosměnných plochách nemusí způsobovat potíže. V případě velké depozice strusky dochází k zvýšení teploty spalin v hořákové oblasti ohniště i celé spalovací komory, což vede k snížení účinnosti výměny tepla a snížení účinnosti kotle [35].

Schéma vzniku struskové částice je zobrazeno na obrázku 8. U tohoto modelu vzniku struskové částice se bere do úvahy, že dané uhlí má velký obsah popelovin s průměrem částic menším než 100 μ m. V tomto případě dochází k přímé oxidaci uhlíku na oxid uhelnatý s následujícím spalováním oxidu uhelnatého mimo mezní vrstvu. U hrubších částic dochází ke zplyňování uhlíku složkami spalin, a to vodou popř. oxidem uhličitým. Struska vzniká na povrchu částice souběžně se spalováním hořlaviny, kdy dochází k tavení popelovin. Uhlík společně s CO vytváří v mezní vrstvě redukční prostředí. Toto redukční prostředí určuje charakter dalších dějů. Popeloviny se mění v částice strusky rychlým ohřevem v proudu plamene [34, 35].



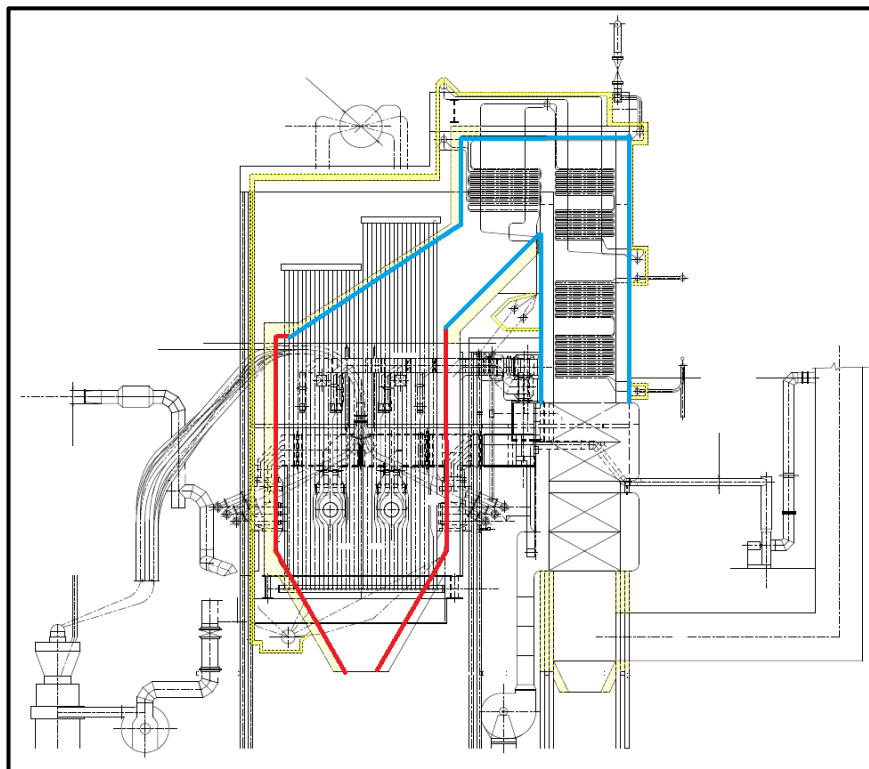
Obrázek 5 Tvorba struskové částice [34].

Autor příspěvku [61] rozdělil nánosy na kovové, amorfní, pórovité a spečence. **Kovové strusky** mají kovový lesk a jsou obvykle spojené se spalováním uhlí bohaté na pyrit v redukční atmosféře. Vysoká specifická hmotnost kovu umožňuje oddělení kovu ze strusky a zůstat oddělený. **Amorfní strusky** jsou tmavé, pevné, sklovité a většinou mají lasturnatý lom. Obvykle se nacházejí v oblastech vyšších teplot. Sklovité strusky se zachycenými bublinami s houbovitém vzhledem jsou klasifikovány jako **pórovité strusky**. Tento typ strusek se vyskytuje v oblastech vysokých teplot. Mohou se také vyskytovat jako slinuté strusky v druhém tahu kotle. **Spečence** jsou složeny z částečně natavených minerálních částic a mohou být klasifikovány jako slinuté. Spečence se vyskytují v horních částech spalovacích komor kotlů, kde je nižší teplota a v druhém tahu kotlů.

6.2. Zanášení (tvorba popílkových nánosů)

Zanášení je definováno jako tvorba usazenin popílku na povrchu v druhém případně dalším tahu kotle [59]. Popílkové nánosy se tvoří při nižších teplotách, kde částečným spečením částic a kondenzací prchavých složek popelovin může dojít ke zpevnění usazené vrstvy. Popílkové nánosy zhoršují prostup tepla a mají vliv na korozi teplosměnných ploch (nizkoteplotní koroze) [34]. Na obrázku 9 jsou znázorněna místa, kde v granulačním kotli

vznikají struskové nánosy (červená barva) a kde popílkové nánosy (modrá barva). Žlutá barva v obrázku představuje vyzdívku a izolaci.



Obrázek 6 Oblasti tvorby struskových a popílkových nánosů v granulačním kotli [94].

6.3. Koroze

Koroze je výsledkem chemické reakce mezi materiálem a složkami spalin, která probíhá za vhodných podmínek. Při spalování uhlí se vyskytují dva typy koroze, a to vysokoteplotní a nízkoteplotní [35].

Vysokoteplotní koroze se vyskytuje na trubkových stěnách ohniště a v oblasti druhého tahu (přehříváku). Příčinou vysokoteplotní koroze je nedokonalé spalování. V místech koroze převažuje redukční atmosféra s obsahem CO, H₂ a zvýšeným obsahem nespálených látek. Intenzita koroze závisí na složení a vlastnostech plynného prostředí, a také na složení a vlastnostech nánosů na povrchu kovových stěn.

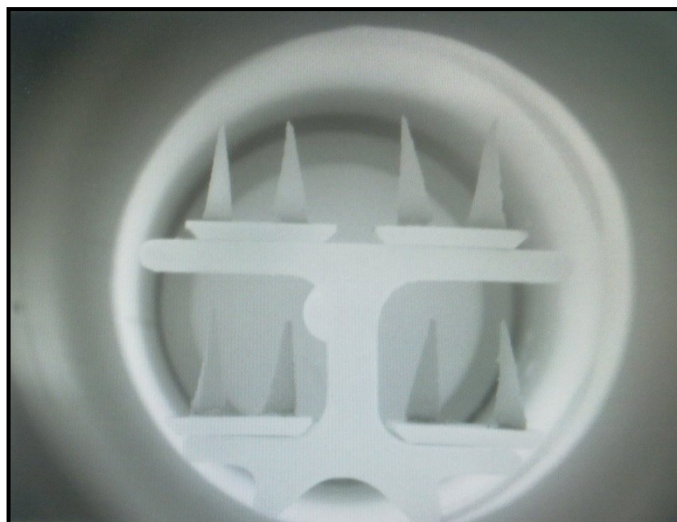
Nízkoteplotní koroze se vyskytuje v druhém tahu kotle (ekonomizér vody, ohřívák vzduchu) reakcí mezi materiálem a kondenzujícími složkami spalin.

7. Indikátory struskování a zanášení

Mezi indikátory struskování a zanášení se řadí termoplastické vlastnosti popela a indexy struskování a zanášení.

7.1. Termoplastické vlastnosti popela - teploty tavitelnosti popela

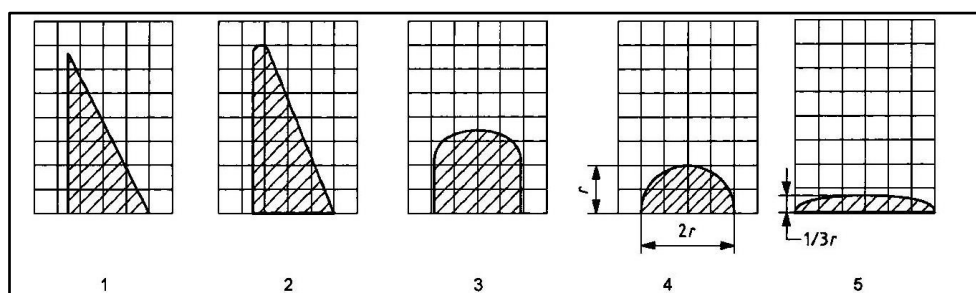
V současné době je nejrozšířenějším kritériem chování popelovin v ohništi při vysokých teplotách určení teplot tavitelnosti popela. Tyto teploty se experimentálně určují v laboratoři, kde se určují tzv. termoplastické vlastnosti popela. Na níže uvedeném obrázku 5 je zobrazen pohled do analyzátoru, kde jsou zjišťovány termoplastické vlastnosti popela.



Obrázek 7 Vzorek v analyzátoru [foto autor].

Stanovení těchto teplot se řídí dle normy ČSN ISO 540 Uhlí a koks – Stanovení tavitelnosti popela. Mezi tyto teploty tavitelnosti patří teplota deformace DT, teplota měknutí ST nebo T_a , teplota tání HT či T_b , teplota tečení FT či T_c . Při určování teplot tavitelnosti popela je zkušební vzorek upraven do tvaru jehlanu, válce, krychle nebo kužele [42]. Na obrázku 6 jsou uvedeny charakteristické tvary zkušebního tělíska ve tvaru kužele.

Teplota deformace je teplota, při které se projevují první náznaky zaoblení zkušebního tělíska v důsledku tání (viz obrázek 6, bod 2). **Teplota měknutí** je teplota, při které vzorky ve tvaru jehlanu nebo kužele mají stejnou výšku jako šířku základny (viz obrázek 6, bod 3). V případě krychle nebo válce jsou okraje zkušebního tělíska zcela zaobleny bez změny výšky. **Teplota tání** je teplota, kdy se zkušební tělíska přibližuje polokouli (viz obrázek 6 bod 4). Při **teplotě tečení** se popel rozteče na podložce ve vrstvě, jejíž výška je třetina výšky zkušebního tělíska při teplotě polokulovitěho tvaru (viz obrázek 6, bod 5) [42].



Obrázek 8 Charakteristické tvary zkušebního tělíska ve tvaru kužele [42].

Velký vliv na tyto teploty má prostředí, ve kterém se vzorek nachází. Prostor může být oxidační, redukční a poloredukční. Autoři příspěvku [43] porovnávali teploty tavitelnosti popela v redukční a oxidační atmosféře a došli k závěru, že tyto teploty kolísají. Vzorky zkoumané v poloredukční atmosféře mají nejnižší teploty tavitelnosti [42, 44].

Je zřejmé, že v případě obsahuje-li popel složky s nízkými teplotami tání je struskování intenzivnější. Z příspěvku autorů [45] vyplývá, že podíl popela transformovaného do strusky je silně ovlivněn teplotou.

Autoři [46] zjistili, že teplota deformace se zvyšuje zmenšujícím se obsahem K_2O a se stoupajícím obsahem MgO , CaO , Fe_2O_3 a Al_2O_3 v popelu.

Teploty tavitelnosti popela (TTP) poskytují orientační údaje o tavitelnosti popela vedoucí ke vzniku strusky a popílkových nánosů. Tyto teploty podávají informace o vhodnosti uhlí pro spalování či zplyňování a jsou důležité při konstrukci kotle. Zejména se jedná o teplotu deformace. Zjišťování TTP je nejrozšířenější používanou metodou [47].

Při měření termoplastických vlastností popela ve třech nezávislých laboratořích byly zjištěny velké rozdíly u teplot deformace. Rozdíl těchto teplot u stejných vzorků uhlí byly až 400°C. Vzhledem k této velké nejistotě byly vyvinuty další metody měření termoplastických vlastností. Mezi nejběžnější patří smršťování, měření elektrického odporu a tepelné vodivosti [23, 49, 50].

7.2. Charakteristické indexy struskování a zanášení

Pro zanášení kotle však stanovení teplot tavitelnosti popela není zcela rozhodující. Z tohoto důvodu byly například vytvořeny různé indexy struskování a zanášení. Mezi tyto indexy patří Teuneho číslo, poměr zásaditých a kyselých složek, ukazatele Babcock-Wilcox, poměr železa a vápníku, součet železa a vápníku, struskovací faktor, T_a index, viskozita, silikátový modul [45].

Do vzorců se dosazují jednotlivé hodnoty z chemického rozboru popela v procentech.

7.2.1. Teuneho číslo

Teuneho číslo představuje poměr kyselých a zásaditých složek popela. Teuneho číslo se vypočítá z rovnice 1.

$$K = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO} \quad [-] \quad (1)$$

Čím je vyšší hodnota Teuneho čísla, tím jsou vyšší teploty fázových změn. Zhruba platí, že pro $K=2,5$ odpovídá HT cca 1 200 °C. Pro $K=4,2$ odpovídá HT cca 1 350°C. Pro $K=5,5$ odpovídá HT nad 1 500 °C. Lehce tavitelné popely mají hodnotu rovnu nebo nižší než 2,4 s teplotou 1150 °C. Středně tavitelné mají hodnotu 2,4-2,5 s teplotou 1150 – 1400 °C a těžce tavitelné mají hodnotu vyšší než 2,5 s teplotou 1400 °C [14, 35, 37].

Někdy se používá pro vyjádření charakteru popela také poměr zásaditých a kyselých složek B/A, tedy $1/K$.

7.2.2. B/A poměr

Původně byl koeficient zásaditých a kyselých složek určen pro fosilní paliva, kde nebyl brán v úvahu fosfor, pro jeho nízký obsah. V současné době se začíná používat vzorec s výskytem fosforu, a to zejména při spalování biomasy. Obsah P_2O_5 (uveden v čitateli) zvyšuje pravděpodobnost vzniku strusky. Jsou-li výsledné hodnoty nižší než 0,4 a vyšší než 0,7 je náchylnost použitého paliva ke struskování nízká až střední. Vysoká náchylnost paliva ke struskování je v rozmezí od 0,4 do 0,7 [51].

Poměr zásaditých a kyselých složek se vypočítá dle rovnice 2.

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad [-] \quad (2)$$

7.2.1. Ukazatele Babcock- Wilcox

Mezi tyto ukazatele patří ukazatel zastruskování (R_s) (rovnice 3) a ukazatel zanášení (R_p) (rovnice 4). Tyto ukazatelé se vzhledem k tvorbě nánosů v kotli považují za spolehlivé [14].

Ukazatel zastruskování platí pro tvorbu struskových nánosů.

$$R_s = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} S^d \quad [-] \quad (3)$$

Z příspěvku [52] vyplývá, že pokud je v uhlí přítomna síra ve formě pyritu dochází ke zvýšení účinku železa, a to až dvojnásobně.

Ukazatel zanášení platí pro tvorbu popílkových nánosů.

$$R_p = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} Na_2O \quad [-] \quad (4)$$

Náchylnost kotlů k zastruskování a zanášení je zobrazena v tabulce 2.

Tabulka 2 Náchylnost kotlů k zastruskování a zanášení [23].

náchylnost kotlů	Rs	Rp
Nízká	<0,6	<0,2
Střední	0,6-0,2	0,2-0,5
Vysoká	2,0-2,6	0,5-1,0
Těžká	>2,6	>1,0

7.2.2. Poměr Fe/Ca

Je-li výsledná hodnota tohoto indexu menší než 0,3 nebo větší než 3,0, je náchylnost ke struskování nízká. Je-li výsledná hodnota od 0,3 do 3,0 je střední až vysoká náchylnost ke struskování [23, 53].

7.2.3. Součet železa a vápníku

V případě je-li součet $Fe_2O_3 + CaO$ nižší než 10 % je použité palivo nízce náchylné ke struskování [23, 53].

7.2.4. Struskovací faktor R_t

Struskovací faktor lze také odvodit z teploty deformace a teploty měknutí. Struskovací faktor se vypočte dle rovnice 5.

$$R_t = \frac{HT + 4DT}{5} \quad [^{\circ}C] \quad (5)$$

Sklon ke struskování je nízký v případě že R_t je vyšší než 1340°C . Je-li výsledná hodnota v rozmezí $1250\text{--}1340^{\circ}\text{C}$ je náchylnost ke struskování střední. V případě rozmezí teplot $1150\text{--}1250^{\circ}\text{C}$ je náchylnost vysoká. Hodnoty teplot pod 1150°C vykazují velkou tendenci ke struskování [54].

7.2.5. Součet $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (T_a)

V případě je-li součet menší než 0,3 % je zanášení nízké. Je-li výsledná hodnota větší než 0,3 % a zároveň menší než 0,4 % je sklon k zanášení střední. Při hodnotě vyšší než 0,4 % je tendence k zanášení vysoká. Index T_a se vypočte dle rovnice 6 [55].

$$T_a = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \text{ [%]} \quad (6)$$

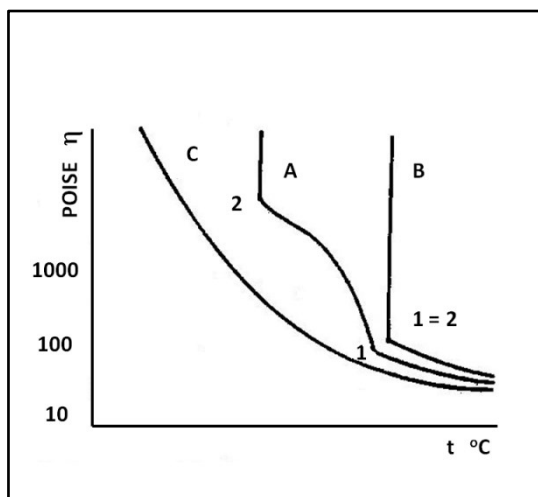
Přítomnost Na a K v palivu je významná především u spalování biomasy.

7.2.6. Viskozita

Viskozita popela je důležitým faktorem pro zachycování a tvorbu strusky v kotlích s tavnou komorou. V současné době jsou v ČR provozovány poslední dva kotle s tímto způsobem spalování a lze očekávat, že v průběhu několika let tento způsob spalování zcela zanikne. Důvodem je tvorba termických oxidů dusíku při spalování a přísné emisní limity na vypouštění NO_x .

Viskozita strusky je převrácená hodnota její tekutosti. Viskozita strusky klesá se stoupající teplotou. Průběh viskozity v závislosti na teplotě jednotlivých druhů strusek je různý. Závisí na chemickém a v plastickém stavu i na mineralogickém složení. Podle reologických vlastností lze strusky rozdělit do tří skupin – viz obrázek 7. Strusky skupiny A jsou strusky s tuhou, plastickou a tekutou oblastí. Strusky skupiny B s tuhou a tekutou oblastí. Strusky skupiny C (skelné strusky) bez plastické deformace. Zůstávají tekuté i při velmi nízkých teplotách [9, 56, 57].

Z výše uvedeného důvodu, je viskozita hlavní fyzikální vlastnost, která ovlivňuje struskování v oblastech vysokých teplot ($> 1093\text{ }^{\circ}\text{C}$) [58].



Obrázek 9 Rozdělení strusek dle reologických vlastností [1].

Viskozitu lze stanovit laboratorně na vhodném viskozimetru. Viskozitu tekuté strusky lze také určit ze složení popela. Vychází se z předpokladu, že některé složky popela zvyšují viskozitu strusky (SiO_2 , Al_2O_3 , a K_2O), zatím co jiné složky viskozitu strusky snižují (CaO , MgO , FeO , Na_2O popř. Fe_2O_3) [1, 34, 35].

Vyjádříme – li viskozitu (K_z) jako hodnotu podílu výše uvedených složek, pak dostáváme tvar:

$$K_z = \frac{\text{SiO}_2 + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})}{0,5(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{CaO}) + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O}} \quad [-] \quad (7)$$

Například pro výtavná ohniště je naopak žádoucí, aby výsledná hodnota byla menší než 7. V případě, je-li potřeba vynášet strusku v tekutém stavu tj. výtavná ohniště, lze využít pro výpočet viskozity strusky silikátový modul viz rovnice 8 [34, 35].

$$S = \frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad [-] \quad (8)$$

8. Možnosti omezení struskování granulačních kotlů

Stěny či horní část granulačního ohniště jsou mimo jiné tvořeny trubkami tvořící plochu výparníku. Obecným předpokladem pro snížení zanášení stěn spalovací komory a granulační výsyvky je správné a intenzivní odvádění uvolněného tepla. Teplota v ohništi v blízkosti teplosměnných ploch a případných stěn ohniště by neměla překročit teplotu tečení popela.

Základním předpokladem pro snížení tvorby nálepů je správné dimenzování geometrie spalovací komory a správné umístění hořáků ve spalovací komoře. Podstatnou podmínkou je správná volba hořáků a správná volby průřezového zatížení a objemového zatížení spalovací komory. Při vysokém zatížení hořákové oblasti i spalovací komory bude vždy docházet ke struskování.

Mezi základní možnosti snížení tvorby nálepů u provozovaných kotlů je používání uhlí s nízkou výhřevností, s vysokým obsahem popelovin a vlhkostí. Další možností snížení teploty v ohništi je volba nižší teploty přehřátí vzduchu, i když v této variantě řešení není mnoho možností. Někdy pomůže i vyšší přebytek vzduchu, ale toto není optimální řešení z důvodu snížení účinnosti kotle a vyššího podílu emisí oxidů dusíků. Jinou možností je i spalování s výrazně nízkým přebytkem vzduchu, ale tato možnost vede ke vzniku výrazně redukčních oblastí spalování a ke vzniku koroze teplosměnných ploch v hořákové oblasti [10].

Další možností je úprava vířivých parametrů hořáků, případně úprava přívodu sekundárních a terciálních vzduchů do spalovací komory.

Jednou z možností je i smíchání různých druhů paliva pro získání optimálních parametrů vedoucích k omezení struskování [3, 31, 33, 62].

Vznik nánosů je možné také omezit chemickou cestou, a to přidáváním aditiv, které omezují struskování. Vzniklé nánosy je nutno z kotlů odstraňovat. Metody odstraňování nánosů jsou popsány v kapitole 10.

9. Aditiva používána pro omezení struskování

Aditiva pro zmírnění tvorby nánosů a koroze mohou využívat různé mechanismy [63]:

- upravovat teploty tavení popela (například MgO , CaCO_3),
- vytvářet krystaly v kapalně fázi pro zvýšení viskozity, a tím zmírnit depozici strusky (oxychlorid mědi),
- odstranění jednotlivých složek, potřebných pro tvorbu depozice (například SO_3 pomocí MgO , alkalické sírany pomocí křemeliny),
- fyzikální narušení depozice vytvořením slabé štěpné roviny (např. vermikulit).

V současné době se na trhu vyskytuje značné množství aditiv, jejichž účelem je snížení tvorby usazenin v kotlích. Účelem těchto aditiv je zvýšení teploty tání popela, snížení pevnosti vzniklých usazenin pro jejich následné odstranění popřípadě snížení korozivních účinků popílku. Mezi používaná aditiva lze zařadit oxid hořečnatý (MgO), oxid vápenatý (CaO), oxid křemičitý (SiO_2), vápenec (CaCO_3), magnezit (MgCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) a vermikulit ($((\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$) [23, 64, 65, 66].

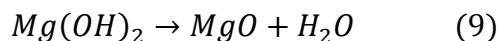
9.1. Rozdělení aditiv

Aditiva lze rozdělit do pěti skupin, a to na aditiva na bázi oxidu hořečnatého, kalcitu (oxidu vápenatého), oxidu křemičitého, hliníkové aditiva a aditiva na bázi manganu.

Aditiva na bázi **oxidu hořečnatého** zahrnují oxid hořečnatý (MgO), hydroxid hořečnatý ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), a magnezit (MgCO_3).

Oxid hořečnatý může být aplikován ve formě prášku nebo ve formě suspenze [67]. Oxid hořečnatý je iontová hydrofobická látka a je jednou z mnoha složek, která je přidávána do spalovacích přísad. Na správné působení aditiva má vliv jeho příprava, specifický povrch a stav spalovací komory [68, 69].

Alternativou je použití hydroxidu hořečnatého, který je vstřikován do vysokoteplotní zóny a vede ke vzniku vysoce reaktivního oxidu hořečnatého dle reakce (9):



Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) a magnezit (MgCO_3) obsahují relativně vysoký podíl MgO, ale jeho účinnost je nižší než čistá forma sloučeniny. Při vysokých teplotách jsou pak přeměněny na MgO [68, 69].

Z výsledků autorů článku [70] vyplývá, že struskování bylo účinně zmírněno přidáním 3 % MgCO_3 , CaCO_3 a Al_2O_3 . Dle autorů nejlepších výsledků dosahoval MgCO_3 .

Autoři příspěvku [71] studovali vliv injektáže suspenze $\text{Mg}(\text{OH})_2$ na snížení struskování v kotli. Došli k závěru, že struskování bylo omezeno v případě dvojnásobného zvýšení obsahu MgO. Naproti tomu autoři [72] zkoumali vliv přídavku MgO různého množství na tavitelnost popela a došli k závěru, že teplota tavitelnosti popela monotónně klesá s rostoucím množstvím přidávaného aditiva.

Dle autorů příspěvku [73] při zvyšování obsahu MgO dochází ke snížení spékání. Avšak když se množství MgO zvedne nad určitou mez nelze jednoznačně stanovit vliv tohoto aditiva.

Zmírnění struskování pomocí nastříkávání kombinace hořčíku s hliníkem a samostatného hořčíku zkoušeli autoři příspěvku [74]. Zjistili, že lepších výsledků dosahuje kombinace hořčíku a hliníku.

Autoři článku [75] zkoumali vliv přídavku MgO na chování a depozici popela hnědého uhlí. Jejich výsledky ukazují, že přidáváním MgO dochází ke snížení tavitelnosti popela. Také potvrdili, že hořčík vytváří s Si, Fe, Al, Ca a Mn pevné kompozity vedoucí k snižování depozice. Dále zjistili, že jedním z mechanismů snížení depozice je vytvoření pevné fáze aluminosilikátů.

Autoři příspěvku [76] potvrdili, že aditiva na bázi hořčíku jsou schopny snížit bod tání popela z důvodu vytvoření nízkotajících eutektických sloučenin.

Autoři v příspěvku [77] zjistili, že Al_2O_3 a K_2O mohou nejprve snižovat teplotu spékání. Se stoupajícím množstvím těchto aditiv došlo ke stoupaní teploty spékání. Zatímco MgO snižovalo teplotu spékání popela v menším rozsahu při snižování množství tohoto aditiva.

Vápenec je poměrně hojně vyskytující se minerál, který obsahuje velké procento uhličitanu vápenatého, zhruba 80 %. Při spalování za vysokých teplot dochází ke vzniku oxidu vápenatého (CaO) v podobě velmi malých částic. V případě je-li spalováno palivo s obsahem síry může dojít k reakci mezi oxidem vápenatým a oxidem siřičitým za vzniku síranu vápenatého. Tato vzniklá sloučenina způsobuje zanášení v druhém tahu kotle. Z tohoto důvodu není vhodné používat vápenec jako aditivum k palivu, které obsahuje velký obsah síry [68].

Oxid křemičitý je k dispozici z mnoha zdrojů, jak od přírodních ložisek, tak po vedlejší produkty z chemického zpracování. Ve většině případů bývá ve formě jemně rozemletého prášku, který usnadňuje jeho použití. Oxid křemičitý v kombinaci s vanadem může být použit ke snížení depozice a korozivních účinků. V některých případech může být oxid křemičitý smíchán s oxichloridem měďnatým, který také může vést ke snížení struskování [68].

Vermikulit

Vermikulit je komplex magnézia, hliníku, železitého silikátu. Vermikulit, díky schopnosti zvětšit svůj objem usnadňuje odstranění vzniklých nánosů při použití ofukovačů [68].

Hydroxid a oxid hlinitý

Snížení depozice strusky může být dosaženo také za použití hydroxidu či oxidu hlinitého. Obecně se dává přednost oxidu hlinitému, protože je měkčí, méně drsný a způsobuje nižší opotřebení hořáků [68].

Manganová aditiva

Manganová aditiva slouží nejen ke snížení struskování a zanášení, ale také ke zlepšení spalování. Přítomnost manganu snižuje teplotu vznícení paliva. Mangan může být aplikován ve formě prášku či ve formě vodných roztoků [68].

9.2. Aditivum NALCO 8270

Tento přípravek je složen ze sloučenin hořčíku. Dávkováním tohoto kapalného aditiva na bázi MgO se nahrazují oxidy kovů ve struktuře popela za vzniku vysokoteplotní reakce $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, a tím zvyšuje teplotu měknutí složek tvořící strusku. Zvyšuje pórovitost strusky, která má pak menší přilnavost a snadno se uvolňuje od povrchů. Tento přípravek také udržuje popel ve formě nelepícího se prášku, potlačuje nalepování popílku na trubkách v kotli a neutralizuje kyselý SO_3 [78].

10. Fyzikální možnosti odstranění vzniklých nánosů

Nánosy vzniklé v kotlích lze odstranit různými metodami, které mohou být založeny na fyzikálním principu. Tyto metody mohou být použity za provozu kotle nebo po jeho odstavení. Ideálně by čištění kotle mělo být šetrné k teplosměnným plochám, nemělo by ovlivňovat rosný bod spalín a zároveň by mělo být ekonomicky vhodné a jednoduché.

Metody prováděné za provozu jsou založeny na nejrůznějších fyzikálních principech. Mezi tyto metody patří parní ofukovače, kuličkový déšť, akustické čištění, vodní ostříky či mechanický oklep a řízená exploze.

Po odstavení kotle se používá mechanické čištění i řízená exploze.

10.1. Metody čištění za provozu kotle

Tyto metody jsou vhodné zejména z důvodu průběžného čištění teplosměnných ploch a tím prodloužení doby provozu kotle. Mezi nevýhody těchto metod lze zařadit poměrně vysoké náklady na pořízení.

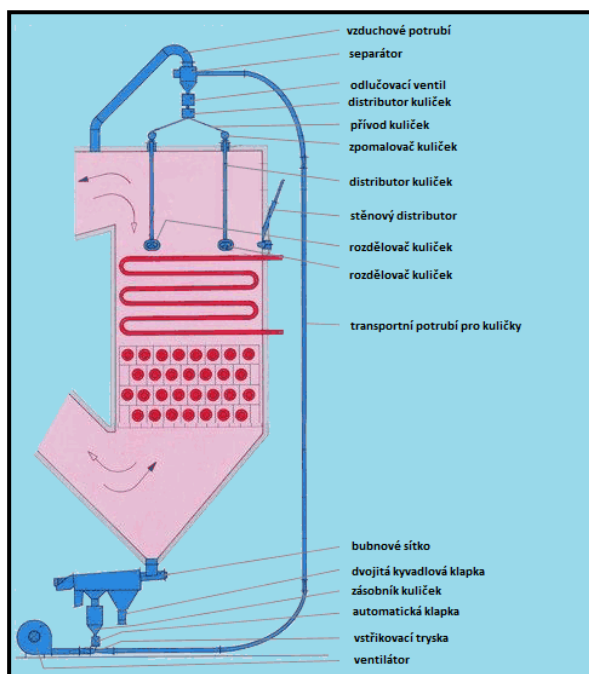
10.1.1. Parní ofukovače

Parní ofukovače čistí výhřevné plochy kotle za jeho provozu foukáním vysokotlaké páry nebo vody na zanesené plochy. Médium se na zanesené oblasti nastříkává pomocí trysek. Médium způsobuje popraskání strusky v důsledku mechanického a tepelného namáhání, a tím dojde k jejímu uvolnění. Konstrukce ofukovačů se liší v závislosti na umístění v kotli. Ofukovače mohou být rozděleny na krátké a dlouhé. Krátké ofukovače (stěnové) odstraňují strusku ve spalovací komoře kotle. Dlouhé ofukovače čistí povrch trubek v konvekčním tahu. Ofukovač odstraňuje strusku interakcí mezi proudem a trubicí v důsledku smykového napětí ve směru dopadu média z trysky. Médium při dopadu dále způsobuje vysokofrekvenční vibrace a v tenkých místech nánosů způsobuje vysoká rychlost média narušení strusky. Schopnost ofukovače odstranit strusku ze zanesených ploch ovlivňuje řada faktorů např. proudové charakteristiky, pevnost vazby na rozhraní

struska – teplosměnná plocha, velikost a tvar strusky. Při použití parního ofukovače dochází k ovlivnění teploty spalin, proto je důležité sledovat provozní podmínky kotle. Nevýhodou ofukovačů je možná koroze trubek a poměrně velká spotřeba vysokotlaké páry [79, 80, 81].

10.1.2. Kuličkový déšť

Tato metoda je založena na mechanickém odstranění vzniklých nánosů pomocí malých kuliček dopadajících na teplosměnné plochy v druhém tahu kotle. Čištění se provádí v jednotlivých cyklech. Parametry se stanoví až podle provozních podmínek. Během čištění jsou kuličky pneumaticky dopravovány do horní části kotle. Následně kuličky dopadají vlivem gravitace na teplosměnné plochy, a tím dochází k odstranění nánosů. Schéma kuličkového deště je uvedeno na obrázku 10. Kuličky mohou být vyrobeny z různých materiálů a velikostí. Velikost kuliček se pohybuje od 4-10 mm. Kuličky mohou být železné, hliníkové, ocelové. Výhodou této metody je suché čištění, nízké provozní náklady, nedochází k ovlivnění rosného bodu spalin, jednoduchá obsluha. Nevýhodou této metody je velký stavební zásah do kotelny a použití pouze v druhém tahu kotle [82].



Obrázek 10 Schéma kuličkového deště [83].

10.1.3. Akustické čištění

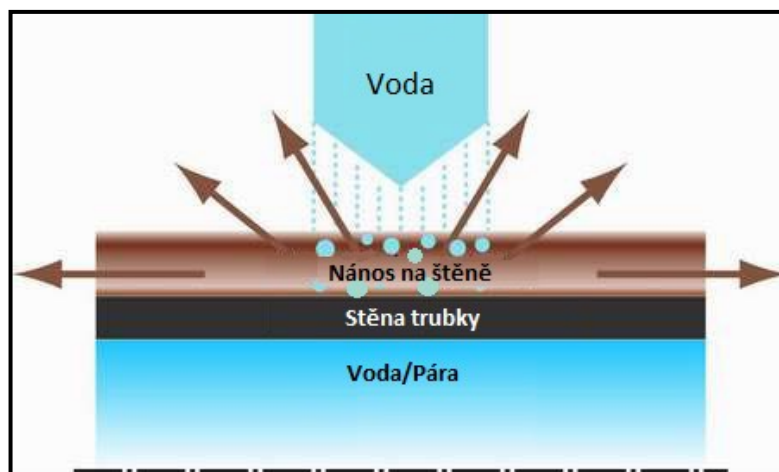
Akustický systém (nitrafon) čistí nánosy vzniklé na teplosměnných plochách pomocí akustického tlaku (šoku). Tato energie je generována pomocí pneumatických akustických měničů jako nízkofrekvenční zvukové vlny. Běžné typy akustických ofukovačů pracují v rozmezí 125-250 Hz. Zvukové vlny se pohybují ve všech směrech a umožňují vyčištění všech i těžko přístupných ploch, které se těžko čistí jinými metodami. Při dopadu na čištěný povrch dochází k rozechvění usazených částic. Tyto částice jsou dále odnášeny kouřovými plyny a čištěný povrch tak zůstává bez usazenin [84].

Akustické metody nepoškozují teplosměnné plochy. Počet rohů potřebných pro čištění kotle je založeno na velikosti kotle a na jeho uspořádání. Dříve byly tyto akustické systémy hojně využívány pro čištění kotlů, které spalovaly rašelinu a dřevěnou štěpku [85, 86].

10.1.4. Vodní ostříky

Při tomto čištění je jako médium používána tlaková voda. Proud vody z vysokotlakých trysek čistí velké plochy spalovací komory díky natáčení trysek. Voda proniká horní vrstvou usazenin, rychle se vypařuje, a tím odlupuje částice strusky teplosměnných ploch. Čištění probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je nástřik tlakové vody na povrch nánosů. Nástřik vody musí mít dostatečnou kinetickou energii, aby mohla proniknout do trhlin a pórů. Rychlost nástřiku se pohybuje okolo $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Druhý krok spočívá v okamžité expanzi vody na vodní páru. Právě tato přeměna vody na vodní páru poskytuje potřebný podnět pro čištění.

Při této metodě je důležitý úhel dopadu tlakové vody na nánosy, který určuje účinek čištění. Účinek čištění lze regulovat rychlostí nástřiku a změnou tlaku. Nevýhodou této metody je ovlivnění rosného bodu spalín [87, 88]. Schéma vodních ostříků je zobrazeno na obrázku 11.



Obrázek 11 Schéma vodních ostříků [89].

10.1.5. Mechanický oklep

Mechanický oklep odstraňuje vzniklé nánosy pomocí pneumatických či mechanicky ovládaných kladiv či válců. Tyto kladiva (válce) v určitých intervalech klepou z vnější stěny kotle na membránové stěny. Většinou jsou umístěny v řadě na spodní straně spalovací komory. V důsledku nárazu kladívka na znečištěné plochy dojde k oscilaci a odstranění vzniklých nálepů [79]. Pro uhelné kotle se tyto systémy prakticky nepoužívají. Využití je u spalovenských kotlů.

10.2. Metody čištění po odstavení kotle

10.2.1. Ruční odstranění

Při ručním odstranění vzniklých nálepů je v kotli postaveno lešení a pomocí tyčí dochází k jejich odstraňování. Příslušní pracovníci musí dodržovat zásady bezpečnosti práce a používat ochranné pomůcky. Pro zajištění osvětlení uvnitř kotle je nutno použít zařízení s bezpečným napětím 24 V nebo oddělovací transformátory. Tento způsob odstranění vzniklých nálepů strusky je používán v Teplárně Přívoz viz obrázek 12.



Obrázek 12 Ruční odstranění vzniklé strusky v TPV [foto autor].

10.2.2. Řízený výbuch

V současné době se tato metoda odstranění vzniklých nánosů používá ve spalovnách a při kombinovaném spalování uhlí a biomasy. Obecně je tato metoda u provozovatelů přijímána s nedůvěrou. Nevýhodou této metody je vysoká míra nebezpečnosti a také možnost poškození technologie [79].

11. Teplárna Přívoz (TPV)

Možnost technologického ověření snížení struskování práškového granulačního kotle pomocí dávkování aditiva do vsázky bylo experimentálně prováděno v Teplárně Přívoz. V této kapitole je stručně popsán její provoz, dále je zde popsáno přidávání aditiva NALCO 8270.

11.1. Popis provozu

Úkolem TPV je výroba elektrické energie a tepelné energie pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody jak pro cizí dodavatele, tak pro vlastní potřebu. Teplárna Přívoz provozuje čtyři granulační kotle (K1 – K4) o celkovém jmenovitém tepelném příkonu 228,6 MW. Tato teplárna spaluje proplástek či proplástek s biomasou s možností spalovat koksárenský plyn jako stabilizační palivo a palivo pro najíždění. Je zde přiveden i zemní plyn jako náhrada koksárenského plynu [90].

Kotle jsou konstruovány jako dvoutahové. V druhém tahu je umístěn konvekční přehřívák páry, ohřívák vody (ekonomizér) a kapsový ohřívák vzduchu [90].

Palivo je před vstupem do spalovací komory mleto pomocí mlýnských jednotek typu Fuller (Fullerův kroužkový mlýn E38). Každý kotel je vybaven třemi mlýnskými, kroužkovými, levotočivými mlýny. Požadovaná jemnost mletí je stanovena hmotnostním zbytkem na sítích 0,2 mm a 0,09 mm. Pro kotle K1 a K4 je hmotnostní zbytek na síti 0,2 mm $5 \div 9 \%$ a na síti 0,09 mm $28 \div 32\%$. Pro kotle K2 a K3 je hmotnostní zbytek na síti 0,2 mm $2 \div 3 \%$, na síti 0,09 mm $8 \div 25\%$. Jemné částice jsou unášeny proudem vzduchu do kopule třídiče, odtud do uhlopráškového potrubí a do hořáků kotle [91].

U kotlů K1 a K4 je do topeniště palivo přiváděno přes 12 práškových rohových hořáků od tří mlýnských jednotek. U kotlů K2 a K3 je palivo přivedeno do topeniště přes tři čelní kombinované hořáky a každý mlýn má pouze jedno uhlopráskové potrubí. Palivo je k mlýnům dopravováno ze dvou zásobníků paliva, každý o obsahu 180 tun [90].

Spalovací proces probíhá ve spalovací komoře (topeništi), která je zakrytá žárobetonovým stropem. V dolní části přechází spalovací komora do dvou výsypek, kterými odchází z topeniště struska přes drtiče typu Martin. Z vnějšku je spalovací komora obložena izolačními matracemi a opatřena oplechováním. Vyzdívka topeniště je těžká, tvořená šamotovými tvarovkami [91].

Uhelný prášek od mlýnů je do topeniště unášen horkým primárním vzduchem přes hořáky. U kotlů K1 a K4 jsou na bocích kotle umístěny proti sobě plynové hořáky, vždy dva na každé straně s možností spalování koksárenského a zemního plynu. Kotle K2 a K3 mají tři čelní hořáky, které umožňují také spalovat koksárenský a zemní plyn. Se sekundárním vzduchem se uhelný prášek promísí až při výstupu s hořáků do spalovací komory. Přebytek vzduchu za ohništěm pro dokonalé spalování bývá 1,25 až 1,30 násobek množství vzduchu potřebného k ideálnímu vyhoření všech spalitelných látek obsažených v uhelném prášku [91].

Struska ochlazená granulačním roštem padá do dvou výsypek ve spodní části topeniště. Za těmito výsypkami jsou umístěny dva drtiče strusky typu Martin viz obrázek 13. V těchto drtičích je struska drcena pomocí dvou ozubených válců, které se otáčejí v horní části drtiče. Ve spodní části (vaně) se žhavá rozdrčená struska zchladí užitkovou vodou. Zchlazená struska je následně vytlačována pomocí tlačné lopaty a výstupního hrdla ven na rovný struskový pás. Rovný struskový pás je umístěn ve struskovém kanále, vedoucím pod všemi drtiči. Rovným a dále pak šikmým struskovým pásem je struska dopravována do zásobníku strusky. Zásobník strusky je umístěn mimo kotelnu a odtud je struska externí firmou odvážena auty na složiště [91].

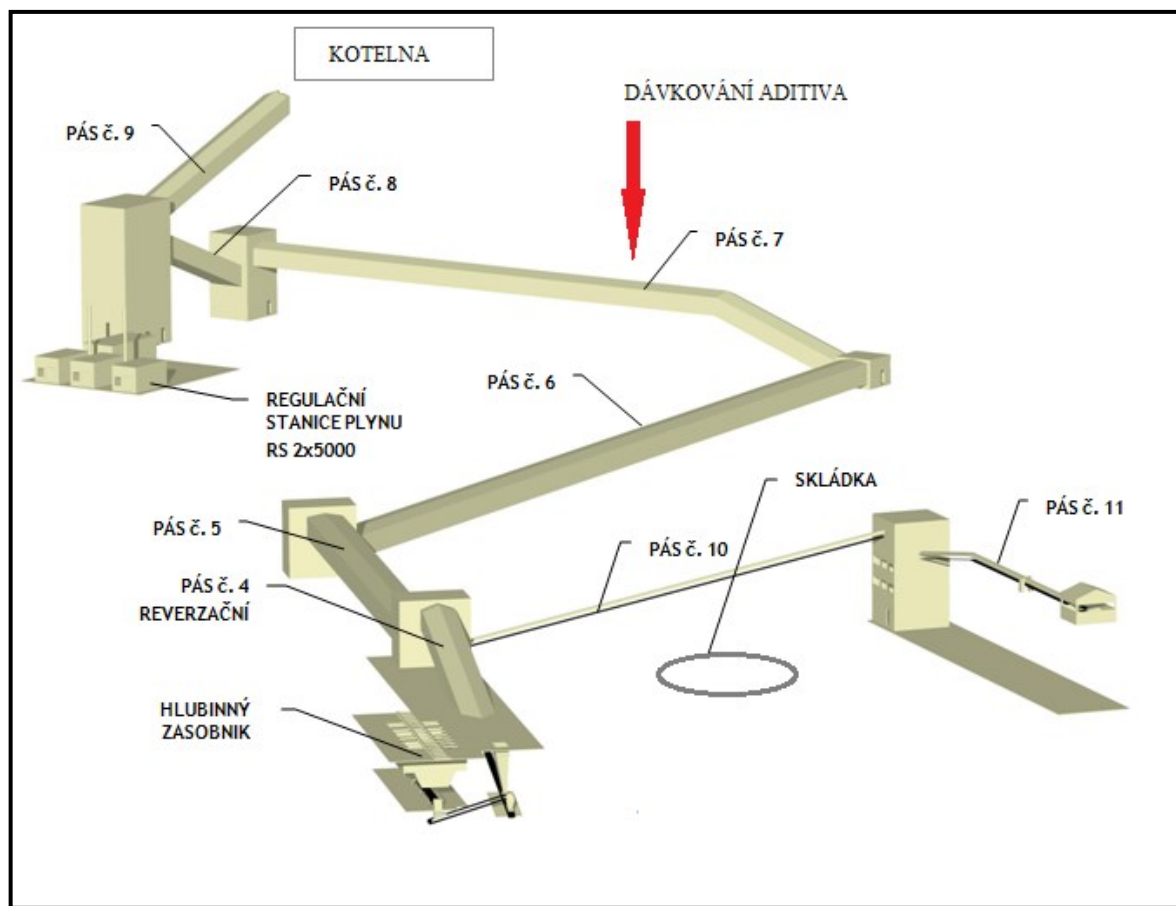


Obrázek 13 Drtič typu „Martin“ [foto autor].

Popílek, který v průběhu spalovacího procesu vzniká ve větším poměru než struska, je s kouřovými plyny odsáván ventilátorem přes komory třísekčního elektroodlučovače. Zde se zachycuje na usazovacích elektrodách a odtud sklepáván do šesti výsypek. Z první sekce jde přes turniketové podavače přímo do mezizásobníku, z dalších dvou sekcí přes turniketové podavače a pneumatické žlaby do mezizásobníku. Z mezizásobníku je popílek pneumaticky dopravován potrubím do sil. Popílek ze sil se sype do autocisteren nebo železničních vagónů a je odvážen externí firmou [91].

11.2. Dávkování aditiva NALCO 8270

Dávkování aditiva NALCO 8270 započalo v říjnu 2013. Dávkování aditiva probíhá pomocí čerpadla na dopravníkový pás číslo 7, který vede do zásobníků surového uhlí na kotelně (obrázek 14).



Obrázek 14 Dávkování aditiva NALCO 8270 [94].

Aditivum je uchováváno v 1 000 litrovém barelu v samostatné místnosti a pomocí rozvodných trubek je transportováno na dopravníkový pás. Barel s čerpadlem je zobrazen na obrázku 15. Po vyčerpání přípravku je barel jednoduchým způsobem vyměněn za další.

*Ing. Hana Nadkanská: Potlačení nálepů strusky v energetických kotlích přidáváním
aditiva do vsázky*



Obrázek 15 Barel s čerpadlem [foto autor].

12. Stanovení účinnosti kotlů

Pro zjištění, zda metoda dávkování aditiva NALCO 8270 je účinné, bylo přistoupeno k výpočtu účinnosti kotlů před a po dávkování aditiva. Stanovení účinnosti je možné pomocí dvou metod, a to přímou a nepřímou metodou.

12.1. Přímá metoda stanovení účinnosti (metoda příkon – výkon)

Přímá metoda, je založena na stanovení potřebných energetických vstupů a výstupů. Účinnost se stanoví jako poměr tepla absorbovaného pracovní látkou (vodou a párou) a tepelného příkonu (chemické teplo a jiné teplo dodané do kotle) [92, 93]. Účinnost přímou metodou se vypočte dle rovnice 10.

$$\eta = \frac{Q_{od}}{Q_{do}} * 100 \quad [\%] \quad (10)$$

Q_{od} teplo odevzdané vodě nebo páře, tedy teplo vyrobené za stejný časový úsek v J/s,

Q_{do} teplo, které je přivedeno do kotle palivem a vzduchem ohřátým cizím zdrojem za určitý časový úsek v J/s

Přímá metoda stanovení účinnosti velkých kotlů se používá pouze pro dlouhodobé bilance a určování ekonomických výsledků.

12.2. Nepřímá metoda stanovení účinnosti

Nepřímá metoda stanovení účinnosti je dána příslušnými normami ČSN a EN a používá se pro okamžité vyhodnocení účinnosti provozu kotlů a porovnání účinnosti pro různá paliva a výkony kotlů. Nepřímá metoda (metoda zjišťování tepelných ztrát) je založena na stanovení dílčích tepelných ztrát, tepelných přebytků a tepla v palivu. Účinnost se pak vypočítá 100 minus poměr součtu všech ztrát viz rovnice 11 [92, 93].

$$\eta = 100 - \sum \text{ztrát} \quad (11)$$

Mezi tepelné ztráty se řadí ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta), ztráta chemickým nedopalem CO, ztráta sáláním a konvekcí a dále ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popelu a popílku [92, 93].

Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta) je ztráta tepla spalin, které jsou odváděny z kotle za poslední teplosměnnou plochou.

Ztráta chemickým nedopalem je ztráta tepla nespálenými plynnými hořlavými složkami odváděnými z kotle ve spalinách.

Ztráta sáláním a konvekcí je ztráta tepla sdílením do okolí z vnějšího povrchu kotle.

Ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popelu a popílku představuje ztrátu hořlavinou v tuhých zbytcích a ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků. Ztráta hořlavin v tuhých zbytcích představuje ztrátu tepla nespálenou hořlavinou odváděnou z kotle v tuhých zbytcích spalování. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků je ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků odváděných z kotle po spalování.

13. Experimentální část

Experimentální část disertační práce je rozdělena na dvě části. V první části jsou provedeny laboratorní experimenty pro zjištění vlivu přísad NALCO 8270 na možnost omezení struskování. Druhá část se zabývá technologickým ověřením snížení struskování práškového granulačního kotle.

13.1. Laboratorní experimenty

V rámci laboratorních experimentů byly z připravených vzorků propláستku zjišťovány termoplastické vlastnosti popela. Dále byly stanoveny parametry propláстku. Pro výpočet indexů náchylnosti použitého „ostravského propláстku“ ke struskování a zanášení byl proveden chemický rozbor popela metodou RTG fluorescence, kde byl celkový obsah základních prvků přepočtený na oxidickou formu. Ostravský proplástek byl také podroben RTG – fluorescenční analýze. Výsledky analýzy jsou uvedeny v příloze A.

Ze vzorků strusky, popílku a propláстku odebraných v Teplárně Přívoz byla provedena RTG difrakce. U strusek byl dále proveden chemický rozbor metodou RTG fluorescence. Dále byly ze strusky připraveny nábrusy pro analýzu SEM/EDAX.

Pro zjištění, zda je možno strusku ukládat na skládku odpadů bylo provedeno stanovení třídy vyluhovatelnosti, ekotoxicity a obsahu škodlivin v sušině.

13.1.1. Termoplastické vlastnosti popela

Při zjišťování termoplastických vlastností byl vzorek ve tvaru trojbokého jehlanu analyzován v poloredukční atmosféře na analyzátoru AF-600 fy LECO. Teplotní rozsah měřicího přístroje je 900 °C až 1500 °C. Zjištění termoplastických vlastností popela bylo zjišťováno ve dvou pokusech dle normy ČSN ISO 540 Uhlí a koks – Stanovení tavitelnosti popela. První a druhý pokus se od sebe liší odebráním vzorku propláстku ze dvou míst skládky. Rozbory byly provedeny akreditovanou laboratoří AmplusServis, a.s.

První pokus

Při tomto pokusu byl vzorek smíchán s aditivem v surovém stavu. Množství dávkovaného aditiva je uvedeno v tabulce 3. Dodavatelem byla doporučená dávka aditiva, a to 10 kg NALCO 8270 na 100 tun propláستku (0,14 g na 2 kg propláستku).

Tabulka 3 Množství dávkovaného aditiva na 2 kg uhlí.

č. vzorku	Dávkování (g/2kg propláستku)
0	0,00
1	0,14
2	0,42
3	0,98
4	1,4

Výsledné hodnoty termoplastických vlastností popela jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4 Výsledné hodnoty termoplastických vlastností popela.

č.vzorku	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
0	1390	1430	1450	1480
1	1370	1390	1440	1470
2	1380	1410	1460	1490
3	1390	1420	1430	1480
4	1350	1390	1410	1460

Z výše uvedené tabulky jednoznačně nevyplyvá vliv přidávání aditiva do použitého propláستku. Hodnoty teploty měknutí a tečení mají klesající tendenci, ale jsou přibližně stejné. Pouze v případě vzorku 2 došlo k nepatrnému zvýšení teploty tání (HT) a tečení (FT).

Druhý pokus

Při tomto pokusu byl vzorek smíchán s aditivem v surovém stavu. Množství přidaného aditiva k propláستku je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka 5 Množství dávkovaného aditiva na 2 kg uhlí.

č. vzorku	Dávkování (g/2kg propláستku)
0	0,00
1	0,14
2	0,21
3	0,07
4	0,29

Výsledné hodnoty termoplastických vlastností popela jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Výsledné hodnoty termoplastických vlastností popela.

č.vzorku	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
0	1330	1410	>1500	>1500
1	1330	1450	>1500	>1500
2	1320	1410	>1500	>1500
3	1330	1390	>1500	>1500
4	1330	1430	>1500	>1500

Z výše uvedené tabulky opět nevyplývá jednoznačný vliv přídavku aditiva do použitého propláستku. Pro laboratorní účely je vzorek spalován v laboratorní muflové peci při teplotě 815 °C. Při pokusu v laboratorních podmínkách může být výsledná teplota tavitelnosti popela ovlivněna rychlosti ohřevu vzorku, typem atmosféry např. rychlost ohřevu v muflové peci je nižší než v kotli.

13.1.2. Parametry propláستku

V tabulce 7 jsou uvedeny parametry ostravského propláستku pro oba pokusy. Rozbory byly provedeny akreditovanou laboratoří Ampluservis, a.s.

Tabulka 7 Parametry ostravského propláستku.

	voda veškerá původní (W_t^r)	popel původní (A^r)	spalné teplo v hořlavině ($Q_{s,daf}$)	výhřevnost původní (Q_i^r)	síra původní (S^r)
	[%]	[%]	[MJ/kg]	[MJ/kg]	[%]
první pokus	9,70	28,24	34,88	20,69	0,34
druhý pokus	8,10	32,78	34,48	19,49	0,31

13.1.3. Výpočet charakteristických indexů struskování a zanášení

Výpočty indexů byly opět provedeny pro dva pokusy. Vzorky prvního i druhého pokusu byly připraveny stejným způsobem jako při stanovení termoplastických vlastností popela. Množství dávkovaného aditiva je uvedeno v tabulce 3 a 5. Pro výpočet indexů struskování použitého ostravského proplásku byla provedena chemická analýza popela. Stanovení základních oxidů popela bylo provedeno metodou XRFS (rentgenová fluorescenční spektrometrie). Rozbory byly provedeny akreditovanou laboratoří Ampluservis, a.s.

Zjištěné obsahy MgO , Al_2O_3 , SiO_2 byly zakresleny do ternárního fázového diagramu pro odhad eutektické teploty.

První pokus

Chemická analýza popela je uvedena v tabulce 8.

Tabulka 8 Chemický rozbor popela (první pokus).

Analyt [% hmot.]	č. vzorku				
	0	1	2	3	4
Na_2O	0,11	0,13	0,06	0,06	0,17
MgO	0,36	0,51	0,44	0,40	0,44
Al_2O_3	7,40	9,70	9,60	8,40	8,60
SiO_2	16,10	20,90	21,50	18,50	19,20
P_2O_5	0,02	0,07	0,03	0,02	0,09
SO_3	1,57	1,66	1,45	1,49	1,42
K_2O	1,17	1,45	1,57	1,29	1,38
CaO	0,87	0,45	1,01	0,94	1,02
TiO_2	0,39	0,39	0,49	0,43	0,43
MnO	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04
Fe_2O_3	2,15	3,09	2,40	2,20	2,86
FeO	0,10	0,14	0,11	0,10	0,13

Hodnoty vypočtených indexů struskování a zanášení prvního pokusu jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 Hodnoty indexů struskování a zanášení prvního pokusu.

index	č. vzorku				
	0	1	2	3	4
Teuneho číslo [-]	6,95	7,56	8,08	7,60	6,44
B/A [-]	0,20	0,18	0,17	0,18	0,21
R _s [-]	7,22	6,72	6,41	6,62	7,69
R _p [-]	2,15	2,36	0,95	1,13	3,53
Fe ₂ O ₃ /CaO [-]	2,47	6,87	2,38	2,34	2,80
Fe ₂ O ₃ +CaO [%]	3,02	3,54	3,41	3,14	3,88
K _z [-]	10,05	10,68	12,02	11,21	9,25
R _t (°C)	1402	1384	1396	1398	1362
T _a [%]	1,28	1,58	1,63	1,35	1,55

Výsledné hodnoty z výše uvedené tabulky jsou porovnány v souladu s jednotlivými indexy uvedenými v kapitole 6.2.

Z výsledných hodnot Teuneho čísla lze usoudit, že čistý proplástek bez přidaného aditiva vykazuje hodnotu vyšší než 2,5 a je tedy těžce tavitelný s teplotou tání nad 1500°C. Nejvyšší hodnota Teuneho čísla byla dosažena u vzorku 2. Při následujícím zvyšování množství aditiva NALCO 8270 již nebylo dosaženo vyšších hodnot.

Z výsledků poměru zásaditých a kyselých složek (B/A) nelze jednoznačně prokázat vliv přídavku NALCO 8270. Náchylnost kotlů ke struskování při použití čistého vzorku je nízká stejně tak jako u ostatních smíchaných vzorků s daným aditivem.

Dle výpočtů indexu zastruskování (R_s) lze konstatovat, že vliv aditiva se projevil jen nepatrně mezi čistým vzorkem a vzorkem 2. Ve všech případech se jedná o těžkou náchylnost ke struskování kotlů, protože vzorky vykazují hodnotu vyšší než 2,5.

Z výpočtu indexu zanášení (R_p) je patrné, že u vzorků 0, 1, 3 a 4 se jedná o těžkou náchylnost k zanášení. Pouze u vzorku 2 došlo k poklesu hodnoty pod 1, a proto se jedná o vysokou náchylnost kotlů k zanášení.

Z poměru $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ vyplývá, že vzorek 0, 2 a 3 vykazuje střední až vysokou náchylnost ke struskování. Vzorek 4 se blíží nižší náchylnosti. Vzorek č. 1 splňuje kritérium nízkého struskování.

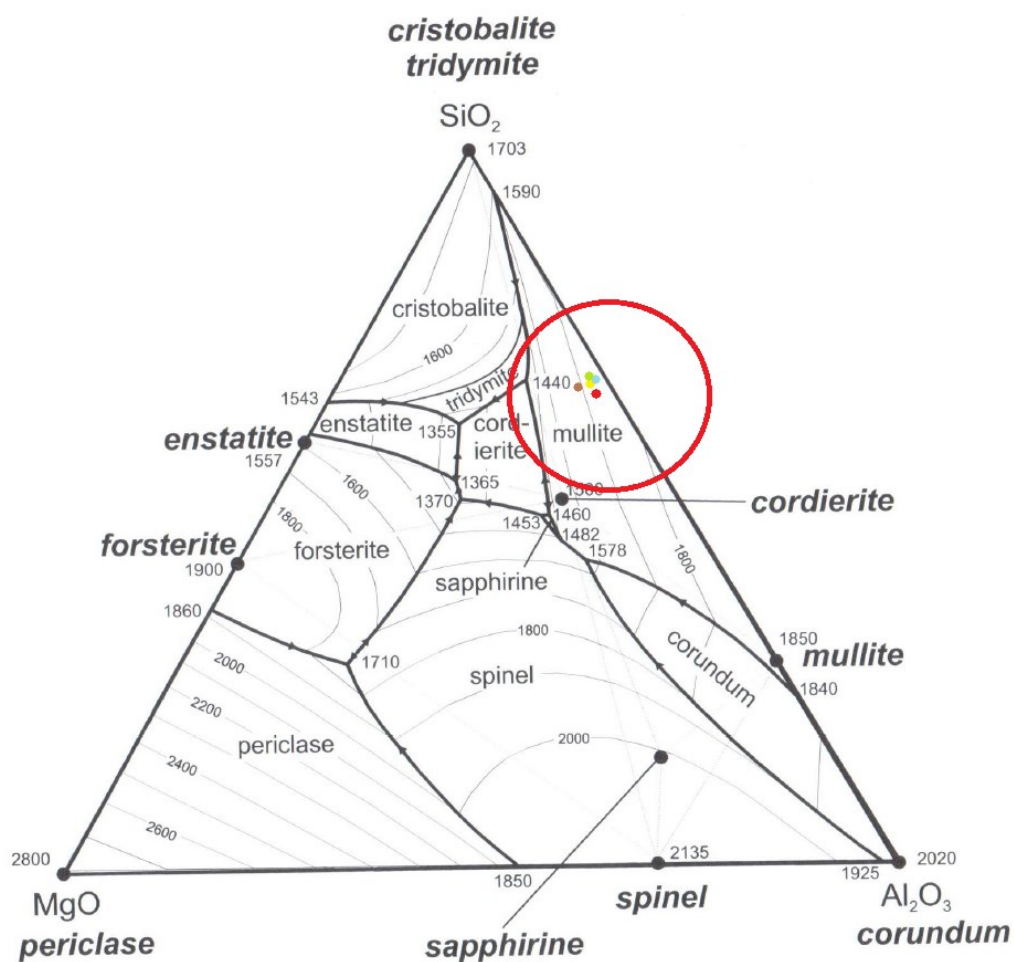
Při součtu Fe_2O_3 a CaO vykazují vzorky nízkou náchylnost ke struskování.

Ze zjištění hodnoty viskozity (K_z) je patrné, že zkoumaný proplástek není vhodný pro výtavná ohniště, kde struska teče.

V případě struskovacího faktoru (R_t) vykazují všechny vzorky nízkou náchylnost ke struskování.

Dle výsledků T_a tedy součtu Na_2O a K_2O se ve všech případech jedná o vysokou tendenci k zanášení.

Na obrázku 16 je zobrazen ternární diagram $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, ze kterého lze odhadnout eutektickou teplotu. Červenou barvou je zaznamenán vzorek 0, žlutou barvou vzorek 1, zelenou barvou vzorek 2, modrou barvou vzorek 3, hnědou barvou vzorek 4.



Obrázek 16 Ternární diagram $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (pokus 1)

Druhý pokus

Chemická analýza popela je uvedena v tabulce 10.

Tabulka 10 Chemický rozbor popela (druhý pokus).

Analyt [% hmot.]	č. vzorku				
	0	1	2	3	4
Na₂O	0,53	0,46	0,53	0,55	0,52
MgO	2,02	1,86	1,97	2,03	2,27
Al₂O₃	25,20	25,00	25,30	25,60	25,50
SiO₂	56,20	57,50	56,40	55,30	55,60
P₂O₅	0,11	0,10	0,14	0,10	0,10
SO₃	1,71	1,62	1,86	1,90	1,79
K₂O	3,03	2,81	2,79	2,86	2,89
CaO	3,49	3,22	3,46	3,83	3,73
TiO₂	1,01	1,10	1,04	1,12	1,04
MnO	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10
Fe₂O₃	5,31	5,09	5,34	5,67	5,51
FeO	2,39	2,29	2,41	2,55	2,48

V níže uvedené tabulce 11 jsou hodnoty indexů struskování a zanášení druhého pokusu.

Tabulka 11 Hodnoty indexů struskování a zanášení druhého pokusu.

index	č. vzorku				
	0	1	2	3	4
Teuneho číslo [-]	9,16	9,82	9,18	8,43	8,68
B/A [-]	0,17	0,16	0,17	0,18	0,18
R_s [-]	6,46	5,95	6,30	6,74	6,72
R_p [-]	9,25	7,40	9,03	10,02	9,45
Fe₂O₃/CaO [-]	1,52	1,58	1,54	1,48	1,48
Fe₂O₃+CaO [%]	8,80	8,31	8,80	9,50	9,24
K_x [-]	8,63	9,37	8,69	8,08	8,07
R_t (°C)	1364	1364	1356	1364	1364
T_a [%]	3,56	3,27	3,32	3,41	3,41

Výsledné hodnoty z výše uvedené tabulky jsou porovnány v souladu s jednotlivými indexy uvedenými v kapitole 6.2.

Vypočtené hodnoty Teuneho čísla vykazují hodnoty vyšší než 2,5 a tedy použitý proplástek je těžce tavitelný s teplotou tání nad 1500 °C. Oproti prvnímu pokusu se hodnota Teuneho čísla zvýšila.

Hodnoty poměru kyselých a zásaditých složek (B/A) jsou téměř totožné. Vzhledem k tomu, že hodnoty jsou nižší, než 0,4 je náchylnost paliva ke struskování nízká. Z tohoto indexu nelze jednoznačně prokázat vliv aditiva NALCO 8270.

Z indexu zastruskování (R_s) vyplývá, že kotle při použití ostravského propláستku jsou těžce náchylné ke struskování. Pouze u vzorku 1 došlo k nepatrnému snížení vypočteného indexu. Ovšem i tento vzorek vykazuje těžkou náchylnost k zastruskování, protože jeho hodnota je vyšší než 2,5.

Také v případě indexu zanášení (R_p) se jedná o těžkou náchylnost kotlů k zanášení při použití ostravského propláستku. Nejlepších hodnot dosahuje, stejně jako v předešlém případě u vzorku 1.

Z poměru železa a vápníku lze usoudit, že náchylnost ke struskování je střední až těžká.

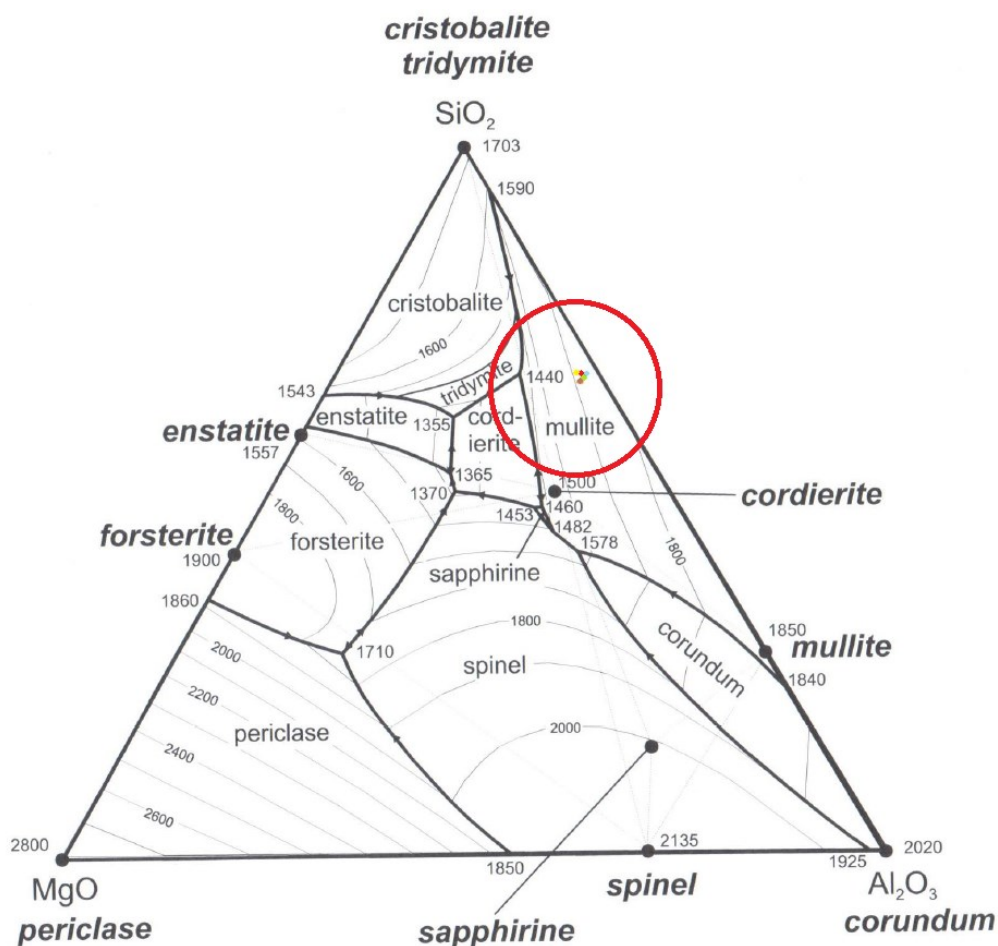
Stejně jako u předchozího pokusu bylo zjištěno, že při součtu Fe_2O_3 a CaO vykazují vzorky nízkou náchylnost ke struskování. Nejhorších výsledků dosahuje vzorek 3, kde se hodnota přibližuje 10. Hodnoty tohoto indexu se zvýšili oproti prvnímu pokusu.

Hodnoty viskozity (K_z) v druhém pokusu oproti prvnímu poklesly a přiblížily se hodnotám vhodným pro výtavná ohniště.

Ze struskovacího faktoru (R_t) vyplývá, že náchylnost ke struskování je nízká, protože hodnoty jsou vyšší než 1340 °C.

Součtu Na_2O a K_2O (T_a) vykazuje vysokou tendenci k zanášení, a to z důvodu, že výsledné hodnoty jsou vyšší než 0,4.

Na obrázku 17 je zobrazen ternární diagram $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, ze kterého lze odhadnout eutektickou teplotu. Červenou barvou je zaznamenán vzorek 0, žlutou barvou vzorek 1, zelenou barvou vzorek 2, modrou barvou vzorek 3, hnědou barvou vzorek 4.



Obrázek 17 Ternární diagram $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (pokus 2).

13.1.4. RTG difrakce a RTG fluorescence

Analýza vzorku proplástku, pěti vzorků strusky a popílku byla provedena pomocí RTG difrakce. Vzorky strusky odebrané z kotlů byly bez a s přidáváním aditiva a biomasy. RTG fluorescence byla provedena u vzorků strusky. Cílem bylo zjištění chemického a mineralogického složení strusky. RTG difrakce strusky a přípravku NALCO 8270 byla

provedena ve zkušební laboratoři výzkumného centra hornin, na Institutu geologického inženýrství, Hornicko – geologické fakulty VŠB – TU Ostrava. RTG fluorescence byla provedena akreditovanou laboratoří AmplusServis, a.s.

RTG difrakce a fluorescence strusky

Strusky byly odebrány z kotlů bez a s přidáváním aditiva a biomasy viz tabulka 12.

Tabulka 12 Rozdělení vstupního materiálu pro vznik strusky.

Struska	palivo	aditivum
1	proplástek + biomasa	-
2	proplástek	-
3	proplástek	-
4	proplástek	5 kg/100 t
5	proplástek	10 kg/100 t

Struska 1 byla odebrána z kotle K3 dne 8.3.2011, kde bylo spalováno uhlí s biomasou. Hmotnostní poměr spalované biomasy a uhlí byl 1:10. Vzniklá struska je tmavé barvy na hranách ostrá a lesklá. Strusku nebylo možné jednoduše odstranit z teplosměnné plochy. Z RTG difrakce vyplývá (tabulka 18), že tato struska obsahuje 100 % amorfního podílu. Tato hodnota by mohla být vysvětlena nedostatečnou teplotou potřebnou k roztavení popelovin a jejich přechodem do amorfního stavu. Na obrázku 18 je zobrazena daná struska.



Obrázek 18 Struska 1 [foto autor].

Celkový obsah základních prvků přepočtených na oxidickou formu je uveden v tabulce 13.

Tabulka 13 Chemické složení strusky 1.

Analyt	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO
[% hmot.]	0,14	3,08	18,90	60,40	0,07	0,04	2,93	4,47	1,04	0,18	8,45	0,38

Struska 2 (obrázek 19) byla odebraná z kotle K3 dne 15.2.2012, kde byl spalován pouze ostravský proplástek. Takto vzniklá struska je tmavé barvy a je velmi pevná. Odstranění takto vzniklé strusky z teplosměnných ploch kotle je velmi složité kvůli její pevnosti. Z RTG difrakce vyplývá (tabulka 18), že struska obsahuje nejvíce amorfního podílu. Dále obsahuje ve větším množství cordierit, kristobalit. V menším množství obsahuje křemen, magnetit a albit. V této struse se v porovnání s ostatními vzorky vyskytují nejnižší množství křemene a albitu.



Obrázek 19 Struska 2 [foto autor].

Celkový obsah základních prvků přepočtených na oxidickou formu je uveden v tabulce 14.

Tabulka 14 Chemické složení strusky 2.

Analyt	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO
[% hmot.]	0,02	2,49	16,40	64,50	0,06	0,01	2,80	3,69	0,81	0,19	8,54	0,38

Struska 3 (obrázek 20) byla odebrána z kotle K2 dne 17.2.2014. Tato struska vznikla při spalování ostravského propláستku bez dávkování aditiva. Z RTG vyplývá (tabulka 18), že tato struska obsahuje nejvíce amorfního podílu. Dále pak obsahuje křemen a mullit. Stejně jako u vzorku strusky č. 2 zde byl detekován albit a magnetit.



Obrázek 20 Struska 3 [foto autor].

Celkový obsah základních prvků přepočtených na oxidickou formu je uveden v tabulce 15.

Tabulka 15 Chemické složení strusky 3.

Analyt [% hmot.]	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO
	0,18	2,04	21,10	61,20	0,07	0,02	3,87	2,25	1,03	0,14	6,64	0,30

Struska 4 (obrázek 21) byla odebrána z kotle K4 dne 12.2.2014. Do kotle bylo dávkováno aditivum NALCO 8270 a to 5 kg na 100 tun. V této strusce (tabulka 18) se opět nejvíce vyskytoval amofrní podíl. Dále je zde zastoupen mullit a v menším množství se zde vyskytuje křemen.



Obrázek 21 Struska 4 [foto autor]

Celkový obsah základních prvků přepočtených na oxidickou formu je uveden v tabulce 16.

Tabulka 16 Chemické složení strusky 4.

Analyt	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO
[% hmot.]												
	0,15	2,10	21,40	60,90	0,07	0,02	3,93	3,15	1,07	0,13	6,50	0,29

Struska 5 (obrázek 22) byla odebrána z kotle K4 dne 19.3.2014. Do kotle bylo dávkováno aditivum v množství 10 kg na 100 tun. Nejvíce se v této strusce (tabulka 18) opět vyskytuje amorfní podíl a dále labradorit a křemen. Pouze v tomto vzorku strusky byl nalezen labradorit a spinel.



Obrázek 22 Struska 5 [foto autor].

Celkový obsah základních prvků přepočtených na oxidickou formu je uveden v tabulce 17.

Tabulka 17 Chemické složení strusky 5.

Analyt	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO
[% hmot.]												
	0,07	2,18	19,70	62,40	0,06	0,06	3,74	3,53	1,05	0,15	6,64	0,30

RTG difrakce popílku

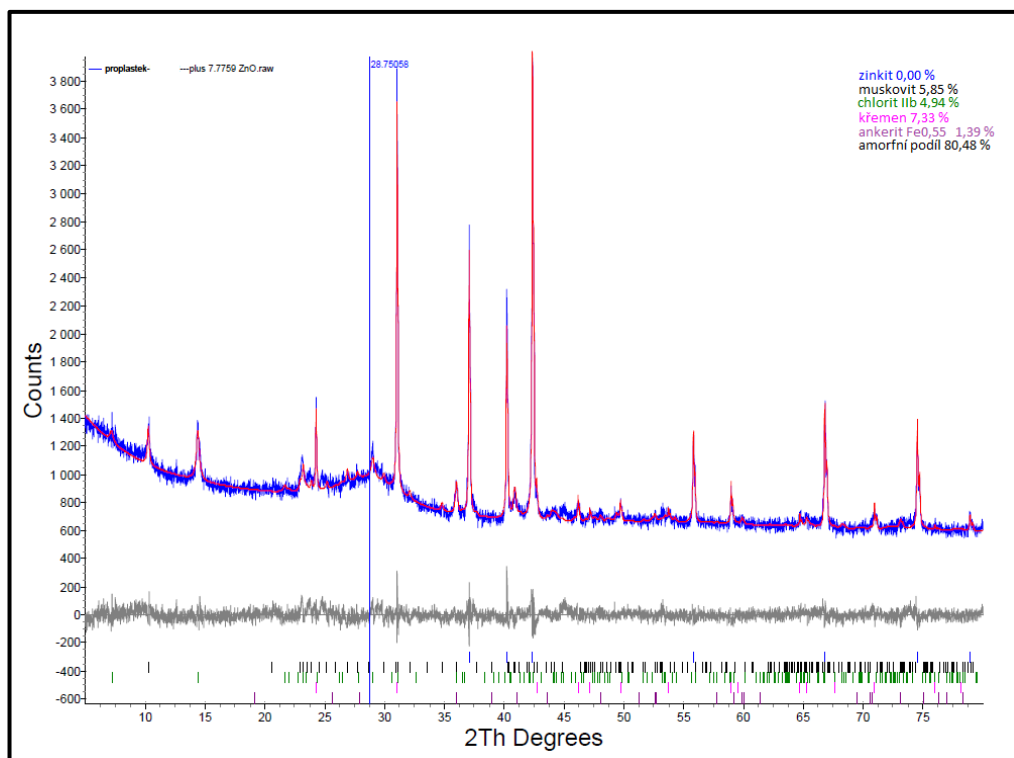
Popílek byl odebrán ze zásobního sila. V popílku se vyskytuje 60 % amorfního podílu, dále zde byl zjištěn křemen a mullit. Hematit, sanidin a anhydride se vyskytují pouze v tomto vzorku.

RTG difrakce propláستku

Z difrakce propláستku vyplývá, že nejvíce se zde opět vyskytuje amorfni podíl, dále křemen, muskovit chlorit a ankerit. Výsledky jsou uvedeny jednak v tabulce č. 18 a také na obrázku 23.

Tabulka 18 Výsledky RTG difrakce.

	struska 1 [%]	struska 2 [%]	struska3 [%]	struska 4 [%]	struska 5 [%]	popílek [%]	propláستek [%]	Tepl. tání [°C] [96]
amorfni podíl	100,00	65,72	61,98	78,66	38,60	60,05	80,48	-
křemen (SiO₂)	-	4,16	19,11	5,29	15,30	20,27	7,33	1800
cordierit (MgFe)₂Al₃(AlSi₅O₁₈)	-	13,26	-	-	6,20	-	-	1435
magnetit (Fe₃O₄)	-	3,09	1,64	-	-	-	-	1592
albit (Na(AlSi₃O₈))	-	1,96	5,83	-	-	-	-	1120
křemen nízkoteplotní modifikace (SiO₂) kristobalit	-	11,81	-	-	5,87	-	-	1695
mullit (3Al₂O₃·2SiO₂)	-	-	11,44	16,05	8,03	8,94	-	1058
labradorit (Na,Ca)(Si,Al)₄O₈	-	-	-	-	17,66	-	-	1230
spinel (MgAl₂O₄)	-	-	-	-	8,29	-	-	2135
hematit (Fe₂O₃)	-	-	-	-	-	1,62	-	1567
sanidin (KAlSi₃O₈)	-	-	-	-	-	2,05	-	1200
anhydrid (CaSO₄)	-	-	-	-	-	0,99	-	1450
muskovit (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂)	-	-	-	-	-	6,10	5,85	1400
chlorit Ilb ((Mg,Fe)₆ (Si,Al)₄O₁₀ (OH)₈)	-	-	-	-	-	-	4,94	-
ankerit (CaFe(CO₃)₂)	-	-	-	-	-	-	1,39	725



Obrázek 23 RTG difrakce proplástek.

13.1.5. Analýza SEM/EDAX

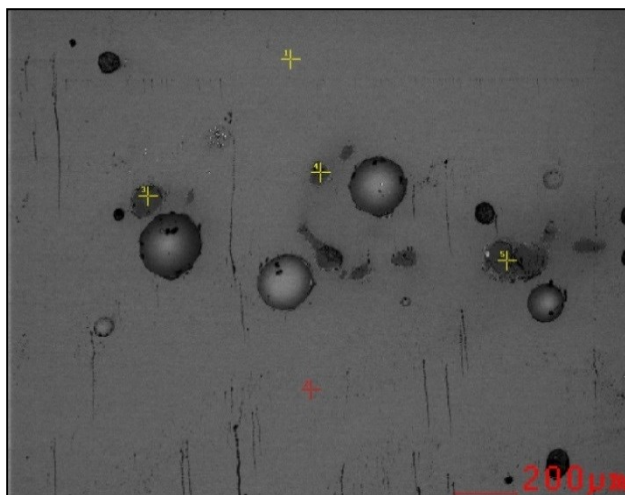
Analýza SEM/EDAX byla provedena Zkušební laboratoři výzkumného centra hornin na Institutu geologického inženýrství, Hornicko – geologické fakulty VŠB – TU Ostrava. Této analýze byly podrobeny strusky odebrány z provozu TPV viz tabulka 12. U každého vzorku strusky jsou uvedeny dva rozborů s hmotnostním a atomovým podílem a dva zvětšené obrázky různého rozlišení. Místo analýzy je označeno červeným křížkem.

Struska 1

Výsledek analýzy strusky 1 prvního rozboru je uveden v tabulce 19 a obrázku 24.

Tabulka 19 Analýza strusky 1.

Prvek	Wt [%]	At [%]
O	40,60	55,96
Mg	1,97	1,79
Al	11,88	9,71
Si	35,05	27,52
K	2,27	1,28
Ca	3,11	1,71
Fe	5,12	2,02

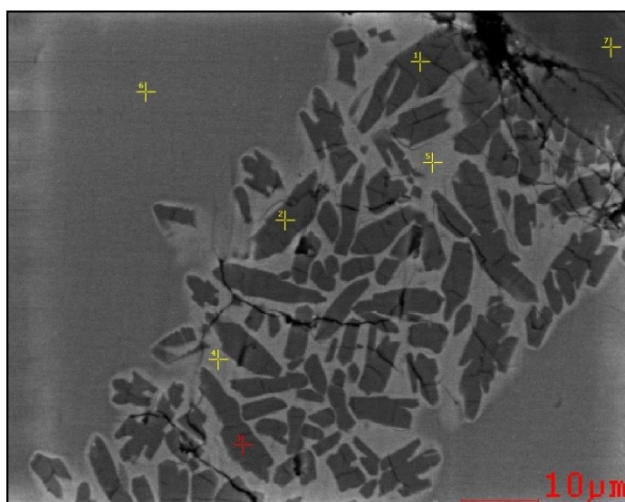


Obrázek 24 Zvětšení strusky1.

Výsledek analýzy strusky 1 druhého rozboru je uveden v tabulce 20 a obrázku 25.

Tabulka 20 Analýza strusky 1.

Prvek	Wt [%]	At [%]
O	45,77	59,66
Al	2,14	1,65
Si	52,10	38,69



Obrázek 25 Zvětšení strusky 1.

Struska 2

Výsledek analýzy strusky 2 prvního rozboru je uveden v tabulce 21 a obrázku 26.

Tabulka 21 Analýza strusky 2.

Prvek	Wt [%]	At [%]
O	29,27	52,56
Mg	2,04	2,41
Al	8,89	9,47
Si	8,74	8,94
K	0,48	0,35
Ca	0,53	0,38
Ti	1,20	0,72
Cr	1,13	0,63
Fe	47,73	24,53

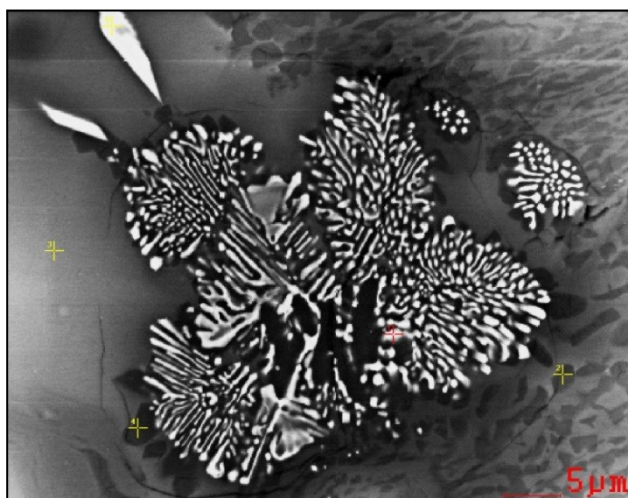


Obrázek 26 Zvětšení strusky 2

Výsledek analýzy strusky 2 druhého rozboru je uveden v tabulce 22 a obrázku 27.

Tabulka 22 Analýza strusky 2.

Prvek	Wt [%]	At [%]
O	32,99	53,43
Mg	1,53	1,63
Al	8,71	8,37
Si	21,93	20,23
Ca	0,50	0,32
Ti	1,08	0,58
Fe	33,26	15,43



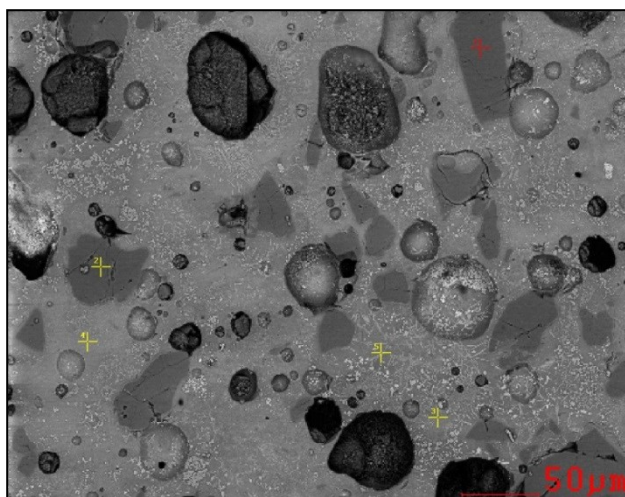
Obrázek 27 Zvětšení strusky 2.

Struska 3

Výsledek analýzy strusky 3 prvního rozboru je uveden v tabulce 23 a obrázku 28.

Tabulka 23 Analýza strusky 3.

Prvek	Wt [%]	At [%]
C	6,70	11,06
O	43,26	53,57
Al	2,72	2,00
Si	47,32	33,38

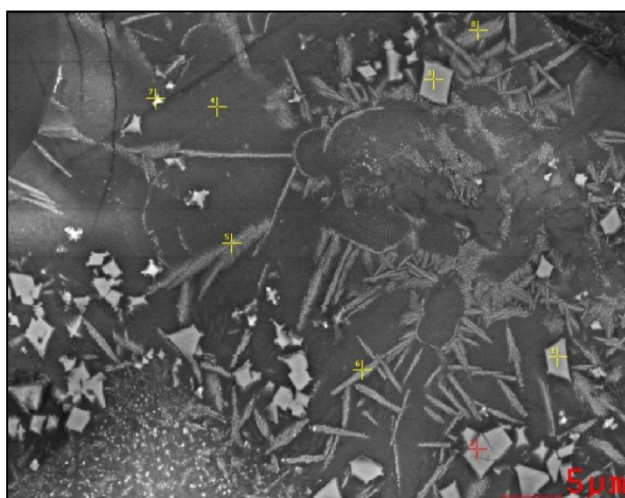


Obrázek 28 Zvětšení strusky 3.

Výsledek analýzy strusky 3 druhého rozboru je uveden v tabulce 24 a obrázku 29.

Tabulka 24 Analýza strusky 3.

Prvek	Wt [%]	At [%]
C	11,90	20,63
O	34,50	44,69
Mg	0,78	4,08
Al	24,76	19,02
Si	7,31	5,39
Fe	16,68	6,19



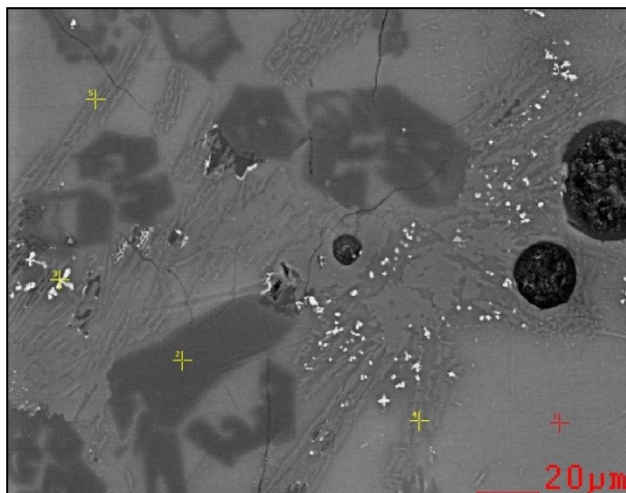
Obrázek 29 Zvětšení strusky 3.

Struska 4

Výsledek analýzy strusky 4 prvního rozboru je uveden v tabulce 25 a obrázku 30.

Tabulka 25 Analýza strusky 4.

Prvek	Wt [%]	At [%]
O	39,19	54,73
Mg	1,65	1,51
Al	10,59	8,77
Si	36,59	29,11
K	3,23	1,85
Ca	3,01	1,68
Ti	0,78	0,36
Fe	4,96	1,99

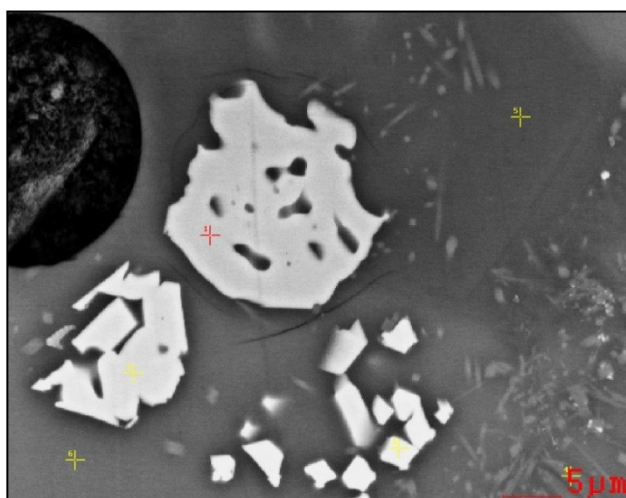


Obrázek 30 Zvětšení strusky 4

Výsledek analýzy strusky 4 druhého rozboru je uveden v tabulce 26 a obrázku 31.

Tabulka 26 Analýza strusky 4.

Prvek	Wt [%]	At [%]
O	32,23	50,73
Mg	7,19	7,46
Al	23,39	21,85
Si	6,53	5,86
K	0,50	0,32
Ca	0,46	0,29
Ti	0,40	0,21
Cr	0,50	0,24
Fe	28,83	13,01



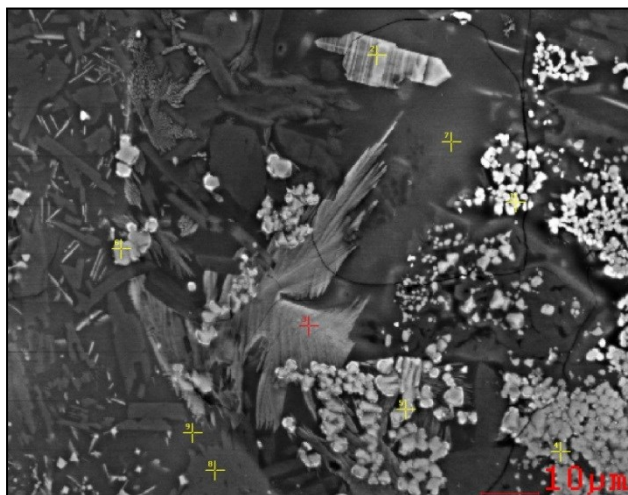
Obrázek 31 Zvětšení strusky 4

Struska 5

Výsledek analýzy strusky 5 prvního rozboru je uveden v tabulce 27 a obrázku 32.

Tabulka 27 Analýza strusky 5.

Prvek	Wt [%]	At [%]
O	42,56	59,27
Mg	5,73	5,25
Al	6,95	5,74
Si	28,66	22,73
K	2,14	1,22
Ca	1,13	0,63
Ti	0,70	0,33
Fe	12,13	4,84

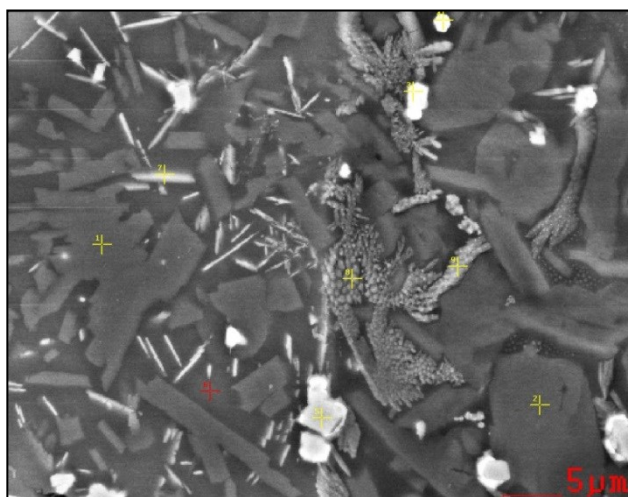


Obrázek 32 Zvětšení strusky 5

Výsledek analýzy strusky 5 druhého rozboru je uveden v tabulce 28 a obrázku 33.

Tabulka 28 Analýza strusky 5.

Prvek	Wt [%]	At [%]
O	40,61	56,02
Al	9,09	7,44
Si	39,65	31,16
K	4,84	2,73
Ca	1,93	1,06
Ti	0,89	0,41
Fe	2,98	1,18



Obrázek 33 Zvětšení strusky 5

13.1.6. Stanovení třídy vyluhovatelnosti, ekotoxicity a obsahu škodlivin v sušině strusky

Stanovení třídy vyluhovatelnosti, ekotoxicity a obsahu škodlivin v sušině strusky byl proveden z důvodu možnosti ukládání vzniklé strusky na skládku dle vyhlášky 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu v platném znění. Rozbory byly provedeny v akreditované zkušební laboratoři LABTECH s.r.o.

Vzorek strusky pro výše uvedené rozbory byl odebrán z kotle K1 dne 8.4.2014, kde bylo dávkováno aditivum, a to 10 kg na 100 tun.

Z výsledných hodnot tříd vyluhovatelnosti bylo zjištěno, že vzorek strusky vyhovuje limitní hodnotám vyhlášky 294/2005 Sb. Protokol o zkoušce je uveden v příloze B.

Z výsledků ekotoxicity je patrné, že výsledky jsou v souladu s vyhláškou 294/2005 Sb. Protokol o zkoušce je uveden v příloze C.

Analýzou sušiny strusky bylo zjištěno, že struska vyhovuje limitním hodnotám dle dané vyhlášky 294/2005 Sb. Protokol o zkoušce je uveden v příloze D.

13.2. Ověření v provozu

V této podkapitole jsou uvedeny výsledky z provozu TPV.

13.2.1. Porovnání čištění kotlů

V tabulce 29 jsou porovnány náklady na čištění kotlů bez aditiva a s aditivem. Sledovaná období k zjištění vlivu aditiva na struskování byla vybrána od roku 2012 do roku 2015 v období říjen až březen, kdy dané kotle spalují největší množství proplásku.

Výsledné hodnoty v žlutém poli ukazují parametry bez použití aditiva. Hodnoty v modrém poli ukazují parametry s přídatkem aditiva.

Cena jednoho kilogramu aditiva je 73 Kč. Od března 2014 do konce října 2014 bylo dávkováno aditivum v množství 10 kg/100 t proplásku.

Tabulka 29 Porovnání čištění kotlů

	celková spotřeba uhlí na kotlích [t]	počet čištěných kotlů	počet odpracovaných hodin na čištění kotlů [h]	náklady na čištění [Kč]	cena aditiva [Kč]	celkové náklady na čištění [Kč]
říjen 12	4784	2	136	19448	0	19448
listopad 12	6933	2	360	51480	0	51480
prosinec 12	8223	4	662	94666	0	94666
celkem	19940	8	1158	165594	0	165594
leden 13	9869	4	486	69498	0	69498
únor 13	6680	3	320	45760	0	45760
březen 13	5871	3	400	57200	0	57200
celkem	22420	10	1206	172458	0	172458
říjen 13	1671	0	0	0	6133	6133
listopad 13	4626	1	80	11440	16977	28417
prosinec 13	5075	2	300	42900	18625	61525
celkem	11372	3	380	54340	41735	96075
leden 14	5852	2	170	24310	21477	45787
únor 14	4695	3	291	41613	17231	58844
březen 14	2181	1	80	11440	16009	27449
celkem	12728	6	541	77363	54716	132079
říjen 14	2736	0	0	0	20082	20082
listopad 14	1859	2	152	21736	6823	28559
prosinec 14	7316	2	224	32032	26850	58882
celkem	11911	4	376	53768	53754	107522
leden 15	8177	2	340	48620	30010	78630
únor 15	6633	3	294	42042	24343	66385
březen 15	5028	1	112	16016	18453	34469
celkem	19838	6	746	106678	72805	179483

Při srovnání přibližně stejného množství spotřebovaného proplásku je patrné, že došlo ke snížení nákladů na čištění kotle při použití aditiva. Připočtením nákladů na aditivum jsou celkové náklady mírně vyšší. Tyto vyšší náklady byly především způsobeny preventivní kontrolou spalovacích komor v průběhu zkoušek dávkování aditiva. Předpokládá se, že v dalším období již nebude docházet k častým odstávkám vzhledem k zjištění stavu spalovacích komor, které vykazovaly mírné zastruskování.

13.2.2. Výpočet účinnosti kotlů

Výpočet účinnosti byl proveden nepřímou metodou dle normy ČSN EN 12952-15 Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – Část 15: Přejímací zkoušky. Pro výpočet účinnosti kotlů byly vybrány dva kotle, a to kotel K1 a K2. Účinnost byla vypočtena pro kotle v době, kdy nebylo dávkováno aditivum tzv. „zanesený kotel“ a v době kdy bylo dávkováno aditivum tzv. „čistý kotel“. Pro výpočet účinnosti byly nutné vstupní údaje získány od provozovatele TPV. Vstupní údaje jsou uvedeny v tabulce 30. Jedná se o provozní parametry kotlů, parametry uhlí a koksárenského plynu. V tabulce je uvedeno rozdělení nespálených zbytků uhlíku v popílku a ve strusce (C) a také jejich poměr (X), tyto údaje jsou důležité pro výpočet ztráty mechanickým nedopalem.

Tabulka 30 Vstupní údaje pro výpočet účinnosti

kotel		K1	K2	K1	K2
		zanesený	zanesený	čistý	čistý
parametr	jednotka	18.1.2012	20.2.2012	1.2.2015	14.3.2015
jmenovitý výkon kotle	[MW _t]	49,70	49,70	49,70	49,70
provozní hodiny	[h]	24,00	24,00	24,00	24,00
teplo v páře	[MW _h]	1171,00	1084,00	976,00	1176,00
teplo v napájecí vodě	[MW _h]	245,00	235,00	208,00	251,00
parametry uhlí	[t]	93,20	64,40	87,60	87,60
Q _{ir}	[GJ/t]	18,81	18,60	21,24	20,38
A ^r	[%]	34,35	28,87	29,28	32,88
W ^r	[%]	8,10	16,30	6,00	5,50
parametry KP					
Q _{ir}	[GJ/tis.m ³]	16,41	16,46	16,85	16,71
C _n H _m	[%obj.]	2,50	2,64	2,55	2,60
CH ₄	[%obj.]	25,64	25,65	26,18	25,62
H ₂	[%obj.]	54,46	54,38	56,50	56,64
O ₂	[%obj.]	0,93	0,97	0,72	0,59
N ₂	[%obj.]	8,34	8,43	6,17	6,43
CO ₂	[%obj.]	2,49	2,42	2,02	2,30
CO	[%obj.]	5,64	5,51	5,86	5,82
CO ₂ +N ₂	[%obj.]	10,83	10,85	8,19	8,73
H ₂ S	[mg/m ³]	18,90	21,70	3,70	30,00
C ve strusce	[%]	2,29	5,17	1,39	1,81
C v popílku	[%]	3,76	8,15	6,42	9,20
X ve strusce	[%]	20,00	20,00	20,00	20,00
X v popílku	[%]	80,00	80,00	80,00	80,00
obsah prchavých složek v popelu	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00
teplota strusky	[°C]	800,00	800,00	800,00	800,00
teplota spalin levá strana	[°C]	144,11	169,59	125,21	131,95
teplota spalin pravá strana	[°C]	143,12	148,48	122,64	123,07
teplota spalin průměr	[°C]	143,62	159,04	123,93	127,51
O ₂ ve spalovací komoře	[%]	5,72	4,40	4,46	4,05
H ₂ O ve spalinách	[l]	0,12	0,15	0,12	0,13
O ₂ ve spalovací komoře v suchých spalinách	[%]	6,53	5,19	5,04	4,68

Dále je nutno pro výpočet účinnosti vzít v úvahu parametry paliva, tedy proplásku a koksárenském plynu (KP). V tabulce 31 jsou uvedeny údaje o palivu.

Tabulka 31 Parametry proplásku a KP.

Složení uhlí původní	kotel	K1	K2	K1	K2
	jednotka	zanesený	zanesený	čistý	čistý
obsah vody W_t^r	[%hm.]	10,00	10,00	10,00	10,00
obsah popela A^r	[%hm.]	30,60	30,60	30,60	30,60
obsah uhlíku C^r	[%hm.]	49,20	49,20	49,20	49,20
obsah vodíku H^r	[%hm.]	3,10	3,10	3,10	3,10
obsah síry S^r	[%hm.]	0,40	0,40	0,40	0,40
obsah dusíku N^r	[%hm.]	0,70	0,70	0,70	0,70
obsah kyslíku O^r	[%hm.]	6,00	6,00	6,00	6,00
Složení uhlí upravené na aktuální vodu a popel					
obsah vody W_t^r	[%hm.]	8,10	16,30	6,00	5,50
obsah popela A^r	[%hm.]	34,35	28,87	29,28	32,88
obsah uhlíku C^r	[%hm.]	47,67	45,41	53,61	51,04
obsah vodíku H^r	[%hm.]	3,00	2,86	3,38	3,22
obsah síry S^r	[%hm.]	0,39	0,37	0,44	0,41
obsah dusíku N^r	[%hm.]	0,68	0,65	0,76	0,73
obsah kyslíku O^r	[%hm.]	5,81	5,54	6,54	6,22
Hm. složení KP					
C_3H_6	[%hm.]	9,23	9,72	10,20	10,12
CH_4	[%hm.]	35,51	35,43	38,30	37,39
H_2	[%hm.]	9,46	9,42	11,07	10,37
O_2	[%hm.]	2,56	2,67	1,78	1,72
N_2	[%hm.]	20,13	20,29	15,39	16,35
CO_2	[%hm.]	9,50	9,21	8,15	9,25
CO	[%hm.]	13,61	13,26	15,10	14,80
hustota plynu (0 °C, 101,325 kPa)	[kg/m ³]	0,52	0,52	0,49	0,49
Výhřevnosti složek plynu dle ČSN EN 12953-11					
C_3H_6	[kJ/kg]	45781,00	45781,00	45781,00	45781,00
CH_4	[kJ/kg]	50013,00	50013,00	50013,00	50013,00
H_2	[kJ/kg]	119971,00	119971,00	119971,00	119971,00
CO	[kJ/kg]	10103,00	10103,00	10103,00	10103,00
Celková výhřevnost KP¹	[kJ/kg]	34705,40	34808,87	37834,00	37265,80
Celková výhřevnost KP²	[kJ/m ³]	17981,60	18082,73	18466,78	18320,07
Celková výhřevnost KP³	[kJ/m ³]	17045,55	17141,42	17505,46	17366,40
Celková výhřevnost KP⁴	[kJ/m ³]	16754,82	16849,05	17206,89	17070,19

¹ výhřevnost KP při referenční teplotě spalování 25 °C

² výhřevnost KP při referenční teplotě spalování 25 °C a objemu při 0 °C a 101,325 kPa

³ výhřevnost KP při referenční teplotě spalování 25 °C a objemu při 15 °C a 101,325 kPa

⁴ výhřevnost KP při referenční teplotě spalování 25 °C a objemu při 20 °C a 101,325 kPa

V tabulce 32 jsou uvedeny hmotností toky a vypočtené ztráty.

Tabulka 32 Hmotnostní toky a vypočtené ztráty

	kotel	K1	K2	K1	K2
parametr	jednotka	zanesený	zanesený	čistý	čistý
Srovnávací teplota pro výpočet účinnosti	[°C]	25,00	25,00	25,00	25,00
Teplota nasávaného vzduchu	[°C]	15,00	15,00	15,00	15,00
Teplota KP	[°C]	15,00	15,00	15,00	15,00
Hm. tok vzduchu do kotle	[kg/s]	19,51	16,10	14,63	17,00
Hm. tok KP	[kg/s]	0,64	0,72	0,35	0,57
Hm. tok škváry	[kg/s]	0,07	0,04	0,06	0,06
Hm. tok popílku	[kg/s]	0,29	0,18	0,24	0,28
Hm. tok spalin	[kg/s]	20,86	16,66	15,69	18,24
Objemový tok KP (0°C, 101,325kPa)	[m ³ /h]	4416,06	5020,40	2582,34	4208,47
Objemový tok KP (15°C, 101,325kPa)	[m ³ /h]	4658,56	5296,10	2724,15	4439,58
Celkový příkon kotle	[kW]	42108,43	38870,79	34606,41	41869,26
Komínová ztráta	[kW]	2653,26	2536,56	1652,03	2011,47
Ztráta sdílení tepla do okolí	[kW]	338,74	338,74	338,74	338,74
Ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popílku	[kW]	392,22	498,93	530,82	871,16
- z toho nedopal v popílku	[kW]	363,07	478,88	510,79	847,13
- z toho entalpií popílku	[kW]	29,16	20,05	20,03	24,03
Ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek ve strusce	[kW]	140,19	115,66	82,09	101,52
- z toho nedopal ve strusce	[kW]	69,39	73,56	26,24	38,53
- z toho entalpií strusky	[kW]	70,80	42,10	55,86	62,99
Ztráta chemickým nedopalem	[kW]	0,72	5,90	2,72	4,69
Ztráty celkem	[kW]	3525,13	3495,79	2606,41	3327,59
Komínová ztráta	[%]	6,30	6,53	4,77	4,80
Ztráta sdílení tepla do okolí	[%]	0,80	0,87	0,98	0,81
Ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popílku	[%]	0,93	1,28	1,53	2,08
- z toho nedopal v popílku	[%]	0,86	1,23	1,48	2,02
- z toho entalpií popílku	[%]	0,07	0,05	0,06	0,06
Ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek ve strusce	[%]	0,33	0,30	0,24	0,24
- z toho nedopal ve strusce	[%]	0,16	0,19	0,08	0,09
- z toho entalpií strusky	[%]	0,17	0,11	0,16	0,15
Ztráta chemickým nedopalem	[%]	0,00	0,02	0,01	0,01
Ztráty celkem	[%]	8,37	8,99	7,53	7,95
Účinnost kotle při srovnávací teplotě 25°C	[%]	91,63	91,01	92,47	92,05
Účinnost kotle při srovnávací teplotě 20°C	[%]	91,38	90,79	92,24	91,84
Účinnost kotle při srovnávací teplotě 15°C	[%]	91,14	90,57	92,02	91,62

Z tabulky jednoznačně vyplývá, že při použití aditiva došlo k zvýšení účinnosti kotle. V případě kotle K1 došlo ke zvýšení účinnosti o 0,84 %. V případě kotle K2 došlo k zvýšení účinnosti o 1,04 %.

Zastruskováním granulačního ohniště dochází sice k snížení ztráty v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popílku vlivem nárůstu teploty spalin. Tím by mohlo dojít k lepší účinnosti kotle. Avšak následkem tohoto zastruskování dojde k zvýšení teploty odcházejících spalin vlivem špatného prostupu tepla v ohništi, což vede k nárůstu komínové ztráty. Důsledkem je celkové snížení účinnosti kotle.

14. Závěr

Cílem této práce bylo zjištění možnosti potlačení nálepů strusky v energetických kotlích přidáváním aditiva do vsázky. Možnost potlačení byla zkoumána v laboratorních podmínkách včetně provozních zkoušek, provedených v Teplárně Přívoz. Konkrétně šlo o kotle s granulačním ohništěm, které jsou zvlášť náchylné k tvorbě nálepů. V těchto kotlích je spalován proplástek, kde bylo přidáváno aditivum NALCO 8270.

V rámci laboratorních experimentů byly pro zjištění termoplastických vlastností popela, indexů struskování a zanášení provedeny dva pokusy. V každém pokusu bylo připraveno pět vzorků s různým množstvím přídavku aditiva NALCO 8270.

Z pěti vzorků při různém množství přidávání aditiva prvního pokusu, byly zjištěny jen nepatrné změny termoplastických vlastností popela. Nejvyšší hodnoty teploty tání a tečení byly zjištěny u vzorku 2, tedy při dávkování 0,42 g na 2 kg proplátku. U druhého pokusu byly výsledné hodnoty tání a tečení u všech pěti vzorků nad 1500 °C, což byl maximální rozsah daného měřicího přístroje. Z výsledků obou pokusů stanovení termoplastických vlastností popela jednoznačně nevyplývá vliv dávkování aditiva NALCO 8270 na teplotu tání a tečení.

Porovnáním indexů struskování a zanášení byly zjištěny následující závěry. Při porovnání Teuneho čísla prvního pokusu bylo zjištěno, že všech pět vzorků vykazuje hodnotu vyšší než 5,5 a je tedy těžce tavitelný s teplotou tání nad 1500°C. Nejvyšší hodnota byla dosažena u vzorku 2, a to 8,08. Naopak nejnižší hodnotu vykazoval vzorek 4, a to 6,44. U druhého pokusu vypočtené hodnoty Teuneho čísla opět vykazují hodnoty vyšší než 5,5. Použitý proplástek je tedy opět těžce tavitelný s teplotou tání nad 1500 °C. Oproti prvnímu pokusu se hodnota Teuneho čísla zvýšila u všech pěti vzorků. Nejvyšší hodnota byla dosažena u vzorku 1 a to 9,82. Nejnižší hodnota byla vypočtena u vzorku 3 a to 8,43.

Hodnoty poměru kyselých a zásaditých složek (B/A) jak při prvním, tak i druhém pokusu jsou téměř totožné. Vzhledem k tomu, že hodnoty jsou nižší než 0,4 je náchylnost

propláستku ke struskování nízká. Z tohoto indexu nelze jednoznačně prokázat vliv aditiva NALCO 8270.

V rámci indexu zastruskování (R_s) bylo u obou pokusů zjištěno, že všechny vzorky vykazují těžkou náchylnost ke struskování.

Z výpočtu indexu zanášení (R_p) je patrné, že u prvního pokusu jsou hodnoty všech vzorků nižší než u druhého pokusu. Pouze u prvního pokusu vzorku 2 se jedná o vysokou náchylnost k zanášení. Ostatní vzorky obou pokusů vykazují těžkou náchylnost k zanášení. Druhý pokus vykazuje horší výsledky než první pokus.

Z poměru Fe_2O_3/CaO prvního pokusu vyplývá, že vzorek 0, 2 a 3 vykazuje střední až vysokou náchylnost ke struskování. Vzorek 4 se blíží nižší náchylnosti. Vzorek 1 splňuje kritérium nízkého struskování. Z poměru železa a vápníku druhého pokusu lze usoudit, že náchylnost ke struskování je střední až těžká.

Součty $Fe_2O_3 + CaO$ v obou pokusech vykazují nízkou náchylnost ke struskování. Ovšem druhý pokus vykazuje horší výsledky než první pokus.

Struskovací faktor (R_t) vykazuje v obou pokusech nízkou náchylnost ke struskování.

Hodnoty indexu (T_a) vykazují vysokou tendenci k zanášení. Druhý pokus opět vykazuje horší hodnoty než první pokus.

Ze všech výše uvedených hodnot indexů není zcela patrný vliv aditiva na struskování a zanášení v obou pokusech, i když se jedná o propláستek z jednoho zdroje.

V rámci disertační práce byla také provedena RTG difrakce a analýza SEM/EDAX strusek odebraných z provozu TPV.

Pro zjištění, zda je možno strusku ukládat na skládku odpadů bylo provedeno stanovení třídy vyluhovatelnosti, ekotoxicky a obsahu škodlivin v sušině. Z analýz vyplynulo, že strusku je možno i nadále ukládat na skládku odpadů.

Z porovnání nákladů na čištění kotlů vyplývá, že při použití aditiva NALCO 8270 jsou náklady na čištění nižší. Započteme – li však cenu aditiva, jsou pak náklady na čištění kotlů při přibližně stejném množství spotřeby propláستku o něco vyšší.

V průběhu dávkování aditiva však byly i nadále prováděny preventivní prohlídky kotlů. Tyto prohlídky byly zaměřeny na místa zvýšené tvorby depozice. Při samotném čištění kotlů s přídavkem aditiva NALCO 8270 docházelo k snížení náročnosti odstraňování nálepů, a tím ke snížení množství odpracovaných hodin.

Dalším příznivým faktorem, který se projevil při dávkování aditiva, bylo zvýšení účinnosti kotle. V případě kotle K1 došlo ke zvýšení účinnosti o 0,84 %. V případě kotle K2 došlo ke zvýšení účinnosti o 1,04 %. Zvýšení účinnosti kotlů vede zejména k úspoře spotřeby propláستku a v neposlední řadě také k snížení produkce emisí.

Budeme - li uvažovat zvýšení účinnosti o 1 %, dojde k snížení spotřeby propláستku o 400 tun ročně. V palivových nákladech činí tato úspora zhruba 400 000 Kč. Tato úspora je vyšší než náklady na aditivum.

Z provedených pokusů tedy vyplývá, že i když laboratorní rozborů nevedly zcela k jednoznačným výsledkům potvrzující vhodnost této metody, po provedených provozních zkouškách lze tuto metodu doporučit k potlačení tvorby nálepů v granulačních kotlích.

Soupis bibliografických citací:

- [1] DOLEŽAL, Richard. *Výtavná ohniště*. Praha: SNTL, 1956.
- [2] DOLEŽAL, Richard. *Ohniště velkých kotlů*. Praha: SNTL, 1966.
- [3] DEGEREJI, M.U et al. Numerical assessment of coals/blends slagging potential in pulverized coal boilers. *Fuel* [online]. 2012, 102: 345-353. DOI: 10.1016/j.fuel. 2012. 07.028. ISSN 00162361. Dostupné též z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236112005777>
- [4] BILIRGEN, Harun, Slagging in PC boilers and developing mitigation strategies. *Fuel*, Volume 115, January 2014, 618-624, ISSN 0016-2361 Dostupné z doi:10.1016/j.fuel. 2013.07.034.
- [5] GUPTA, S.K., T.F. WALL, R.A. CREELMAN a R.P. GUPTA, Ash fusion temperatures and the transformations of coal ash particles to slag. *Fuel Processing Technology*, Volume 56, Issues 1–2, July 1998, 33-43, ISSN 0378-3820, Dostupné z doi: 10.1016/S0378-3820(97)00090-8.
- [6] BARROSO, J., J. BALLESTER, a A. PINA. Study of coal ash deposition in an entrained flow reactor: Assessment of traditional and alternative slagging indices. *Fuel Processing Technology*, Volume 88, Issue 9, September 2007, Pages 865-876, ISSN 0378-3820. Dostupné z doi: 10.1016/j.fuproc.2007.04.008.
- [7] SU, S., J.H., POHL, a D. HOLCOMBE. Fouling propensities of blended coals in pulverized coal-fired power station boilers. *Fuel*, 82(13), pp. 1653-1667. ISSN 0016-2361. Dostupné z doi: 10.1016/S0016-2361(03)00071-1.
- [8] LIBICH, Vladimír a Ladislav OCHRANA, L. *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1989.

- [9] ČERNÝ, Václav. *Parní kotle a spalovací zařízení*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975, 526 s.
- [10] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle- 2. část. *TZB-info* [online]. [cit. 2015-07-21]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [11] KADRNOŽKA, Jaroslav a Ladislav OCHRANA. *Teplárenství*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 178 s. ISBN 80-7204-222-x.
- [12] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 151 s. ISBN 978-80-248-1716-3.
- [13] KURFÜRST, Jiří. *Kompendium ochrany kvality ovzduší*. Vyd. 1. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2008, 407 s. ISBN 978-80-86832-38-8.
- [14] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 858 s.
- [15] M.U, DEGEREJI, et al. Prediction of ash slagging propensity in a pulverized coal combustion furnace, *Fuel*, Volume 101, November 2012, Pages 171-178, ISSN 0016-2361. Dostupné z doi:10.1016/j.fuel.2010.12.038.
- [16] On-line Geologické encyklopedie [online], [cit. 30. 9. 2013]. Dostupné z: <<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?uhli>>.
- [17] MEYERS, Robert a Amir ATTAR. *Coal structure*. New York: Academic Press, 1982, xiii, 340 p. ISBN 0124930808.
- [18] PŁAZA, P. *The Development of a Slagging and Fouling Predictive Methodology for Large Scale Pulverised Boilers Fired with Coal/Biomass Blends* [online]. Cardiff, UK, 2013 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://orca.cf.ac.uk/58453/1/2014PlazaPPPhD.pdf>.

Disertační práce. Cardiff University for the Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. Vedoucí práce Nicholas Syred a Anthony J. Griffiths.

[19] DIK, E.P., A.N. SOBOLEVA a A.V. SHTEGMAN, 2013. Effect of the mineral part of coals on their slagging and contamination properties. *Power Technology and Engineering*, 47(2), pp. 125-132. Dostupné též z : <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10749-013-0409-2>

[20] SUÁREZ-RUIZ, Isabel a John C CRELLING. *Applied coal petrology: the role of petrology in coal utilization*. Burlington: Elsevier/Academic Press, c2008, xviii, 388 s., [8] s. obr. příl. ISBN 978-0-08-045051-3.

[21] GORBATY, Martin L, John W LARSEN a Irving WENDER. *Coal science*. New York: Academic Press, 1983, xi, 300 s. ISBN 0-12-150702-5.

[22] WEBER, R. et al. On predicting the ash behaviour using Computational Fluid Dynamics, *Fuel Processing Technology*, Volume 105, January 2013, Pages 113-128, ISSN 0378-3820. Dostupné z doi: 10.1016/j.fuproc.2011.09.008.

[23] RAASK, Erich. *Mineral impurities in coal combustion: behavior, problems, and remedial measures*. Hemisphere Pub. Corp., c1985, xxi, 484 p. ISBN 08-911-6362-X.

[24] WEN H., et al. Transformation of minerals in direct coal liquefaction residue under gasification atmosphere at high temperatures, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, Volume 43, Issue 3, March 2015, Pages 257-265, ISSN 1872-5813. Dostupné z doi: 10.1016/S1872-5813(15)30005-0.

[25] ZHONGXIAO Z. et al. The effect of iron-bearing mineral melting behavior on ash deposition during coal combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 33, Issue 2, 2011, Pages 2853-2861, ISSN 1540-7489. Dostupné z doi: 10.1016/j.proci.2010.07.061.

- [26] S.J. GROVES, J. WILLIAMSON a A. SANYAL, Decomposition of pyrite during pulverized coal combustion, *Fuel*, Volume 66, Issue 4, April 1987, Pages 461-466, ISSN 0016-2361, Dostupné z doi: 10.1016/0016-2361(87)90148-7.
- [27] ZHANG, G. editor D. *Ultra-supercritical Coal Power Plants Materials, Technologies and Optimisation*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2013. ISBN 978-085-7097-514.
- [28] TOMECZEK Jerzy a Henryk PALUGNIOK, Kinetics of mineral matter transformation during coal combustion, *Fuel*, Volume 81, Issue 10, July 2002, Pages 1251-1258, ISSN 0016-2361. Dostupné z doi: 10.1016/S0016-2361(02)00027-3.
- [29] SRINIVASACHAR S. et al. Mineral behavior during coal combustion 2. Illite transformations, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 16, Issue 4, 1990, Pages 293-302, ISSN 0360-1285. Dostupné z doi: 10.1016/0360-1285(90)90038-5.
- [30] REES-GRALTON, THOMAS M.. *The Development of a Prediction Tool for Utility Boiler Performance* [online]. Cardiff, UK, 2007 [cit. 2014-07-29]. Dostupné z: <http://orca.cf.ac.uk/54842/1/U585231.pdf>. Disertační práce. Division of Mechanical Engineering and Energy Studies Cardiff School of Engineering.
- [31] RUSHDI A., A SHARMA a R. GUPTA, An experimental study of the effect of coal blending on ash deposition, *Fuel*, Volume 83, Issues 4–5, March 2004, Pages 495-506, ISSN 0016-2361. Dostupné z doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2003.08.013>.
- [32] BINGZHI, L. *Modeling of fireside deposit formation in two industrial furnaces* [online]. Finland, 2013 [cit. 2014-07-29]. Dostupné z: Modeling of fireside deposit formation in two industrial furnaces. Disertační práce. Abo Akademi university.
- [33] XIAOJIANG, W. et al. Main mineral melting behavior and mineral reaction mechanism at molecular level of blended coal ash under gasification condition, *Fuel*

Processing Technology, Volume 91, Issue 11, November 2010, Pages 1591-1600, ISSN 0378-3820. Dostupné z doi:10.1016/j.fuproc.2010.06.007.

[34] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 118 s. ISBN 978-80-248-2550-2.

[35] TEYSSLER, Jiří. *Spalování popelnatých hnědých uhlí*. Praha: SNTL, 1988

[36] DOPITA, Miloslav. *Geologie české části hornoslezské pánve*. 1. vyd. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR, 1997, 278 s., [54] s. obr. příl. ISBN 80-7212-011-5.

[37] NOSKIEVIČ, Pavel a VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ V OSTRAVĚ.,. *Spalování uhlí*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1993, 62 s. ISBN 80-7078-197-1.

[38] ROUBÍČEK, Václav a Jaroslav BUCHTELE. *Uhlí: zdroje, procesy, užití*. Ostrava: Montanex, 2002, 173 s. Odborné publikace (Montanex). ISBN 80-7225-063-9.

[39] MÍKA, Martin, et al. Jak potlačit spékání biomasového popela?. *Biom.cz* [online]. 2011, č. 1 [cit. 2015-04-21]. Dostupné též z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-potlacit-spekani-biomasoveho-popela>

[40] *Teaching Phase Equilibria: Ternary Phase Diagrams* [online]. [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: http://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/ternary_diagrams.html

[41] *Teaching Phase Equilibria: Ternary Phase Diagrams* [online]. [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: http://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/ternary_diagrams.html

[42] ČSN ISO 540. Uhlí a koks – Stanovení tavitelnosti popela. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009

[43] LLOYD, W.G. et al. 1993. Ash fusion temperatures under oxidizing conditions. *Energy & Fuels*, 7(4), pp. 490-494. Dostupné z :<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0027627968&partnerID=40&md5=1f6a2be65922d89993bfb5b5b386f5b0>

- [44] DYK, J.C. et al., Waanders, Coal and coal ash characteristics to understand mineral transformations and slag formativ. *Fuel*, Volume 88, Issue 6, June 2009, Pages 1057-1063, ISSN 0016-2361, Dostupné z doi: 10.1016/j.fuel.2008.11.034
- [45] PRNOBIS, M., S. KALISZ a M. POLOK. The impact of coal characteristics on the fouling of stoker-fired boiler convection surfaces. *Fuel*, Volume 112, October 2013, Pages 473-482, ISSN 0016-2361, Dostupné z doi: 10.1016/j.fuel.2013.05.044
- [46] NIU, Y. et al. Experimental study on the coexistent dual slagging in biomass-fired furnaces: Alkali- and silicate melt-induced slagging, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 35, Issue 2, 2015, Pages 2405-2413, ISSN 1540-7489. Dostupné z doi: 10.1016/j.proci.2014.06.120.
- [47] MARIKA, V., et al. Reducing atmosphere ash fusion temperatures of a mixture of coal-associated minerals — The effect of inorganic additives and ashing temperature, *Fuel Processing Technology*, Volume 124, August 2014, Pages 78-86, ISSN 0378-3820, Dostupné z doi: 10.1016/j.fuproc.2014.02.014.
- [48] WALL, T.F. et al. Deformation temperatures for ash fusibility associated with the conditions for ash preparation, *Fuel*, Volume 78, Issue 9, July 1999, Pages 1057-1063, ISSN 0016-2361. Dostupné z doi:10.1016/S0016-2361(99)00017-4.
- [49] WALL, T. F. et al. Coal ash fusion temperatures—New characterization techniques, and implications for slagging and fouling. *Progress in Energy and Combustion Science* Volume 24, Issue 4, 1998, Pages 345-353, ISSN 0360-1285. Dostupné z doi: 10.1016/S0360-1285(98)00010-0.
- [50] LÓPEZ, C. et al. Overview of Actual Methods for Characterization of Ash Deposition. In: *ECI Conference on Heat exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications*. (May 18-22, 2003). Santa Fe, New Mexico, USA.

- [51] PRNOBIS, Marek. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations (2005) *Biomass and Bioenergy*, 28 (4), pp. 375-383. Dostupné z doi: 10.1016/j.biombioe.2004.11.003
- [52] HATT, R. Understanding boiler slag. Coal Combustion. [cit. 2014-07-29]. Dostupné z: <http://www.coalcombustion.com/publications.html>
- [53] BRYERS, R. W. (1996). Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 22, Issue 1, 1996, Pages 29-120, ISSN 0360-1285. Dostupné z doi: 10.1016/0360-1285(95)00012-7.
- [54] Folgueras M.B., M. Alonso, a J.R. Folgueras. Modification of lignite ash fusion temperatures by the addition of different types of sewage sludge, *Fuel Processing Technology*, Volume 131, March 2015, Pages 348-355, ISSN 0378-3820. Dostupné z doi: 10.1016/j.fuproc.2014.12.002.
- [55] VAMVUKA, D. a KAKARAS, E., (2011). Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends. *Fuel Processing Technology*, 92(3), pp. 570-581, ISSN 0378-3820. Dostupné z doi: 10.1016/j.fuproc.2010.11.013
- [56] WIGLEY F., J.WILLIAMSON, a A.R. JONES. Slagging indices for UK coals and their relationship with mineral matter, *Fuel Processing Technology*, Volume 24, January 1990, Pages 383-389, ISSN 0378-3820, Dostupné z doi: 10.1016/0378-3820(90)90077-6.
- [57] BROWNING, G.J., et al. An empirical method for the prediction of coal ash slag viscosity(2003) *Energy and Fuels*, 17(3), pp. 731-737. Dostupné z doi: 10.1021/ef020165o
- [58] ARVELAKIS, S., B. FOLKEDAHL, F.J. FRANDSEN a J. HURLEY. Studying the melting behaviour of fly ash from the incineration of MSW using viscosity and heated stage XRD data. *Fuel*. 2008, 87(10-11): 2269-2280. ISSN 00162361. Dostupné z doi: 10.1016/j.fuel.2008.01.011.

- [59] PANAGIOTIDIS , I. et al. Study of slagging and fouling mechanisms in a lignite-fired power plant, *Applied Thermal Engineering*, Volume 74, 5 January 2015, Pages 156-164, ISSN 1359-4311. Dostupné z doi : [10.1016/j.applthermaleng.2014.03.043](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.043).
- [60] WINEGARTNER E.C. *Coal fouling and slagging parameters*. The American society of mechanical engineers, 1974, 34s.
- [61] HATT, R. M. Fireside deposits in coal-fired utility boilers. *Progress in Energy and Combustion Science* 1990 16:235-241.
- [62] QIU, J.-R. et al. Influences of mineral behaviour on blended coal ash fusion characteristics. *Fuel*, Volume 78, Issue 8, June 1999, Pages 963-969, ISSN 0016-2361. Dostupné z doi: [10.1016/S0016-2361\(99\)00005-8](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00005-8).
- [63] BRITISH COAL CORPORATION. *The Role of Fuel Additives to Control Environmental Emissions and ASH Fouling: Technical Coal Research: Technical Coal Research*. Luxembourg: Stationery Office Books, 1994. ISBN 978-0119738971
- [64] COWAN, Jack C a Donald J WEINTRITT. *Water-formed scale deposits*. Houston, Tex.: Gulf Pub. Co., Book Division, c1976, x, 596 p. ISBN 0872018962
- [65] FRAYNE, C., *Boiler Water Treatment- Principles and Practice*, Volume I-II, Chemical Publishing Company Inc, ISBN 978-0-8206-0371-1
- [66] BARTELS, M. et al. Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: Mechanisms, detection and preventiv, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 34, Issue 5, October 2008, Pages 633-666, ISSN 0360-1285. Dostupné z doi: [10.1016/j.pecs.2008.04.002](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.04.002).
- [67] RADWAY, J.E., “The Selection and Use of Fireside Additives on Industrial Boilers”, *Proceedings from the Third Industrial Energy Technology Conference* Houston, TX, April 26-29, 1981

[68] ROESSLER, D.M. a D.R Huffman. Magnesium Oxide (MgO), Handbook of Optical Constants of Solids II, edited by Palik, E.D., Elsevier, pp 919-955 (1998).

[69] BOTT, T. *Fouling of heat exchangers*. Amsterdam: Elsevier, 1995, xxii, 524 s. Chemical engineering monographs. ISBN 04-448-2186-4.

[70] YUAN Y. et al. Effects comparison on anti-slagging additives of corn straw biomass pellet fuel (2010) Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 26 (11), pp. 251-255. Dostupné z doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.043

[71] POHLET J.H. et al. Expanded use of high-sulfur, low-fusion coals in utility boilers: effect of additives. *Fuel and Energy Abstracts*, Volume 43, Issue 3, May 2002, Page 204, ISSN 0140-6701. Dostupné z doi: 10.1016/S0140-6701(02)85874-X.

[72] GAO, F., a Y. MA. Study on the effect of Mg^{2+} and Na^{+} on the fusibility of coal ash with high ash fusion point. *Ranliao Huaxue Xuebao/Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 40(10), 1161-1166. Dostupné též z : <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84870360095&partnerID=40&md5=1d045eac2d6d2897e41c82f04e10cd>

[73] JING, N. et al. (2012) Effect of Chemical Composition on Sintering Behavior of Jincheng Coal Ash Under Gasification Atmosphere *Chemical Engineering Communications*, 199 (2), pp. 189-202. Dostupné z doi: 10.1080/00986445.2011.582531

[74] LIBUTTI B.L. a J.H. BRANDON. Effective use of oxide mixtures as fuel additives. In: Pap NACE Conf. (Natl Assoc Corros Eng), Toronto; 1975. p. 162. Dostupné též z: http://www.researchgate.net/publication/239879915_Effective_use_of_oxide_mixtures_as_fuel_additives._Paper_No._162

[75] KATSUYA A. et al. Effect of MgO addition to upgraded brown coal on ash-deposition behavior during combustion, *Fuel*, Volume 90, Issue 11, , Pages 3230-3236, ISSN 0016-2361. Dostupné z doi: 10.1016/j.fuel.2011.06.041.

[76] NINOMIYA, Y. et al. Evaluation of a mg-based additive for particulate matter (PM)_{2.5} reduction during pulverized coal combustion. *Energy and Fuels*, 24(1), 199-204. Dostupné též z: [http://www.researchgate.net/publication/231274330_Evaluation_of_a_Mg-Based Additive_for_Part particulate_Matter_%28PM%292.5_Reduction_during_Pulverized_Coal_Combustion](http://www.researchgate.net/publication/231274330_Evaluation_of_a_Mg-Based_Additive_for_Part particulate_Matter_%28PM%292.5_Reduction_during_Pulverized_Coal_Combustion)

[77] WANG Q-H. et al. Experiments on the effect of chemical components of coal ash on the sintering temperature. (2010) *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 35 (6), pp. 1015-1020. Dostupné též z :<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77954382092&partnerID=40&md5=5a1f029828d784d8c8f1c5f119f4a126>

[78] NALCO 8270. Praha: Nalco,2013

[79] ZBOGAR A. et al. Shedding of ash deposits, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 35, Issue 1, February 2009, Pages 31-56, ISSN 0360-1285. Dostupné z doi: 10.1016/j.pecs.2008.07.001.

[80] HARE, N., M. RASUL, a MOAZZEM S. A review on boiler deposition/fouling prevention and removal techniques for power plant, *Recent advances in energy and environment*. IASME/WSEAS International Conference on Energy and Environment, 23-25 February, 2010, University of Cambridge, UK, WSEAS press, pp. 217-222. Dostupné též z: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Cambridge/EE/EE-32.pdf>

[81] ZIAUL, Huque et al. *Slag characterization and removal using pulse detonation technology during coal gasification* [online]. [cit. 2015-07-27]. Dostupné též z: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/7530>

[82] ZIAUL, Huque et al. *Slag characterization and removal using pulse detonation technology during coal gasification* [online]. [cit. 2015-07-27]. Dostupné též z: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/7530>

- [83] FGV Ltd. *The shot cleaning company: Shot cleaning units: diagram* [online]. [cit. 2015-07-15]. Dostupné z: http://fgw-ltd.de/en/kugelregenanlagen_schema.php
- [84] IPH SERVIS MORAVA, s.r.o. *Zvukové ofukovače* [online]. [cit. 2015-07-15]. Dostupné z: <http://www.iph.cz/ofukovace-zvukove.htm>
- [85] F. HARLEY & CO. PVT. LTD. *Nirafon Acoustic Cleaning Systems* [online]. [cit. 2015-07-15]. Dostupné z: <http://www.harleynirafonindia.com/acousticproddet.php>
- [86] NIRAFONS. *Acoustic cleaners* [online]. [cit. 2015-07-15]. Dostupné z: <http://www.nirafon.com/products>
- [87] MARTINO, Justin. *Boiler Cleaning Methods & Techniques* [online]. In: . [cit. 2015-07-15]. Dostupné z: <http://www.power-eng.com/articles/print/volume-118/issue-4/features/boiler-cleaning-methods-techniques.html>
- [88] NATIONAL BOILER SERVICE. *Techniques for Power Plant Boiler Deslagging* [online]. [cit. 2015-07-15]. Dostupné z: <http://www.nationalboiler.com/blog/boiler-maintenance/techniques-for-power-plant-boiler-deslagging/>
- [89] CLYDE BERGEMANN POWER GROUP. *Mechanism of Thermal Tube Impact* [online]. [cit. 2015-07-15]. Dostupné z: <http://www.cba-ssd.com/Applications/knowledgeBase/Mechanism/thermalimpact.htm>
- [90] *Místní provozní a pracovní předpis kolte K1 – K4*. Dalkia Česká republika, a.s., 2007
- [91] *Místní provozní a pracovní předpis ZOS, provoz TPV: MPP pro mlýny a odstruskování*. Dalkia Česká republika, a.s., 2008
- [92] ČSN 07 0305. *Hodnocení kotlových ztrát*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1983.

- [93] ČSN EN 12952 – 15. *Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – část 15: Přejímací zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [94] *Dokumentace o ochraně před výbuchem dle nařízení vlády č.406/2004 Sb. Teplárna Přívoz*. VST engineering, 2013.
- [95] AKIYAMA, K. et al., Ash deposition behavior of upgraded brown coal in pulverized coal combustion boiler. *Fuel Processing Technology*, Volume 92, Issue 7, July 2011, Pages 1355-1361, ISSN 0378-3820, Dostupné z doi: 10.1016/j.fuproc.2011.02.016.
- [96] FÖLDVÁRI, Mária. *Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice*. Budapest: Geological Institute of Hungary (=Magyar Állami Földtani Intézet), 2011. ISBN 9789636712884.

Publikace autora

NADKANSKÁ, H., ČECH, B., BOUCHAL, T., ZÁVADA, J. The impact of sulphur dioxide emissions on the environment and the possibilities of lowering them by means of semi-dry desulphurization method. In *SGEM 2013 : 13th international multidisciplinary scientific geoconference : GeoConference on Energy and Clean Technologies : 16-22, June, 2013, Albena, Bulgaria : conference proceedings. [Book 4]*. Sofia : STEF92 Technology Ltd., 2013, s. 1009-1016.

NADKANSKÁ, H., SMATANOVÁ, N., ZÁVADA, J., MALÍKOVÁ, P. Slagging and fouling in pulverized coal boilers and possibilities of reducing this by adding an additive. In *SGEM 2015 : 15th international multidisciplinary scientific geoconference : conference proceedings : 18-24 June, 2015, Albena, Bulgaria. Volume I, Geology, mineral processing, oil and gas exploration*. Sofia : STEF92 Technology Ltd., 2015, s. 713-718.

NADKANSKÁ, H., SMATANOVÁ, N., ZÁVADA, J. The effect of the addition of additives on ash thermoplastic properties. In *SGEM 2015: 15th International Multidisciplinary Scientific Conference SGEM 2015: Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining : 18-24.June, 2015, Albena, Bulgaria : conference proceedings. Volume III.* Sofia : STEF92 Technology Ltd., 2015, s. 667-674.

Seznam příloh

Příloha A - RTG fluorescenční analýza propláستku.....	-1-
Příloha B - Výsledky testu vyluhovatelnosti strusky.....	-3-
Příloha C - Výsledky testu ekotoxikity strusky.....	-7-
Příloha D - Výsledky analýzy sušiny strusky.....	-12-

Příloha A – RTG fluorescenční analýza proplástku.



Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě

Centrum hygienických laboratoří

Zkušební laboratoř č. 1393 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025

Partyzánské náměstí 7, 702 00 Ostrava

PROTOKOL č. 50695/2014

Zákazník : VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ-TECHNICKÁ
UNIVERZITA OSTRAVA
17. listopadu 15
708 33 Ostrava-Poruba

Číslo zakázky : 9656
Příjem vzorku : 1.9.2014 12:00
Vyšetření vzorku : 1.9.2014 - 25.9.2014
Číslo jednací : ZU/07095/2014
Číslo spisu : S-ZU/07095/2014
Spisový znak : 4.0.3

Číslo objednávky : OP7702512/1114 - strusky

Vzorek číslo : 99247
Datum odběru : neuvedeno
Název vzorku : vzorek číslo Dürer 1
Množství vzorku : 5,0 g
Matrice : pevné vzorky
Vzorkoval : zákazník
Způsob odběru : neuvedeno
Účel odběru : dle požadavku zákazníka

Čas odběru : neuvedeno

Výsledky zkoušení - chemické vyšetření

Ukazatel	Hodnota	Jednotka	TYP	Použitá metoda	Nejistota
Hg (rtuť)	<0,700	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Ag (stříbro)	<0,500	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Al (hliník)	54200	mg/kg	A	SOP OV 202	±10%
As (arzen)	<0,500	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Ba (baryum)	247	mg/kg	A	SOP OV 202	±25%
Bi (bismut)	<0,500	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Br (brom)	10,5	mg/kg	A	SOP OV 202	±10%
Ca (vápník)	7930	mg/kg	A	SOP OV 202	±15%
Cd (kadmium)	<0,300	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Ce (cer)	50,8	mg/kg	A	SOP OV 202	±25%
Cl (chlor)	612	mg/kg	N	SOP OV 202	±40%
Co (kobalt)	<20,0	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Cr (chrom)	58,1	mg/kg	A	SOP OV 202	±30%
Cs (cesium)	8,30	mg/kg	A	SOP OV 202	±50%
Cu (měď)	24,9	mg/kg	A	SOP OV 202	±30%
Fe (železo)	16400	mg/kg	A	SOP OV 202	±10%
Ga (gallium)	12,9	mg/kg	A	SOP OV 202	±40%
Ge (germanium)	1,20	mg/kg	A	SOP OV 202	±40%
I (jod)	8,30	mg/kg	A	SOP OV 202	±20%
K (draslík)	10600	mg/kg	A	SOP OV 202	±15%
La (lanthan)	30,8	mg/kg	A	SOP OV 202	±30%
Mg (hořčík)	<50000	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Mn (mangan)	274	mg/kg	A	SOP OV 202	±25%
Mo (molybden)	<2,00	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Na (sodík)	<150000	mg/kg	A	SOP OV 202	-
Nb (niob)	5,90	mg/kg	A	SOP OV 202	±15%
Ni (nikl)	21,2	mg/kg	A	SOP OV 202	±30%
P (fosfor)	196	mg/kg	A	SOP OV 202	±40%
Pb (olovo)	30,4	mg/kg	A	SOP OV 202	±25%
Rb (rubidium)	67,9	mg/kg	A	SOP OV 202	±10%
S (síra)	2390	mg/kg	A	SOP OV 202	±50%
Sb (antimon)	1,40	mg/kg	A	SOP OV 202	±40%

Příloha A (pokračování).

Výsledky zkoušení - chemické vyšetření					
Ukazatel	Hodnota	Jednotka	TYP	Použitá metoda	Nejistota
Se (selen)	1,20	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±40%
Si (křemík)	96000	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±10%
Sn (cín)	3,20	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±25%
Sr (stroncium)	91,2	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±10%
Ta (tantal)	<8,00	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	-
Te (tellur)	1,00	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±35%
Th (thorium)	11,6	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±10%
Ti (titan)	2420	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±30%
Tl (thallium)	2,00	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±25%
U (uran)	4,30	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±35%
V (vanad)	67,7	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±40%
W (wolfram)	9,30	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±33%
Y (yttrium)	16,3	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±10%
Zn (zinek)	46,2	mg/kg	A	SOP OV 202 ²	±15%

Příloha B – Výsledky testu vyluhovatelnosti strusky.



LABTECH s.r.o., Polní 23/340, 639 00 BRNO
Zkušební laboratoř Paskov
akreditovaná ČIA č. 1147



PROTOKOL O ZKOUŠCE Č. P 1520/14

Objednatel : Dalkia Česká republika, a.s.
28.října 3337/7
702 00 Ostrava, Moravská Ostrava

Číslo smlouvy :
Zhotovitel : č. 140/14
Objednatel : smlouva č.1405-0181-Z2

Strana/celkem : 1 / 4

Akce : Zjištění vlastností strusky v TPV 4/2014

Typ vzorku : struska ze spalování uhlí
Místo odběru : Dalkia ČR, a.s., RSEMI - závod Ostrava-střed, provoz Teplárna Přívoz, Křišťanova ul.,
Ostrava - Přívoz, držiče strusky K1
Identifikace původce odpadu : Dalkia Česká republika, a.s., 28.října 3337/7, 702 00 Ostrava
Odběr provedl : objednatel
Evidenční číslo vzorku : P2846
Označení vzorku : TPV-struska K1 (výluh)
kód odpadu - 10 01 01

Datum odběru vzorku :	08.04.2014	--	Ukončení odběru :	--
Datum převzetí vzorku :	17.04.2014	14:00	Datum zahájení zkoušek :	22.04.2014
Datum vypracování protokolu :	12.05.2014		Protokol vypracoval :	Šodková Petra

Způsob zpracování a úpravy vzorků :

Příprava vodného výluhu se řídí vyhláškou MŽP č. 294/2005 Sb. a ČSN EN 12457.

Schválil :

Ing. Věra Halvová

zástupce vedoucího Zkušební laboratoře Paskov



Prohlášení : Výsledky zkoušek a analýz se týkají pouze předmětu zkoušek a analýz a nenahrazují jiné dokumenty. Bez písemného souhlasu zkušební laboratoře se nesmí protokol reprodukovat jinak než celý.

Příloha B (pokračování).

Labtech s.r.o.

Protokol č. : P 1520/14
Strana : 2 / 4

ZÁKLADNÍ PODMÍNKY

Parametr	Jednotka	P2846
datum provedení výluhu	-	25.4.14
pH	-	10,8
elektrická konduktivita	mS/m	32,5
vzhled výluhu	-	čirý
hmotnost laboratorního vzorku	kg	5,0
hmotnost analytického vzorku	kg	0,075
vlhkost	%	0,27
sušina	%	99,73
objem vyluhovací kapaliny	ml	750
teplota výluhu	°C	22,8

ANALÝZA VÝLUHU

Parametr	Jednotka	P2846 TPV-struska K1	Limitní hodnoty dle vyhl. č. 294/2005 Sb. Tabulka č. 2.1 - třídy vyluhovatelnosti							
			I a		II a		II b		III	
			1.ř.	2.ř.	1.ř.	2.ř.	1.ř.	2.ř.	1.ř.	2.ř.
DOC	mg/l	3,66	50	V	80	V	80	V	100	V
fenolový index	mg/l	<0,01	0,1	V						
chloridy	mg/l	<10	80	V	1500	V	1500	V	2500	V
fluoridy	mg/l	0,3	1	V	30	V	15	V	50	V
sirany	mg/l	16,5	100	V	3000	V	2000	V	5000	V
rtuť (Hg)	mg/l	<0,0001	0,001	V	0,2	V	0,02	V	0,2	V
RL 105°C	mg/l	140	400	V	8000	V	6000	V	10000	V
arsen (As)	mg/l	0,0096	0,05	V	2,5	V	0,2	V	2,5	V
baryum (Ba)	mg/l	<0,01	2	V	30	V	10	V	30	V
kadmium (Cd)	mg/l	<0,0001	0,001	V	0,5	V	0,1	V	0,5	V
chrom (Cr)	mg/l	<0,03	0,05	V	7	V	1	V	7	V
měď (Cu)	mg/l	<0,005	0,2	V	10	V	5	V	10	V
molybden (Mo)	mg/l	0,0136	0,05	V	3	V	1	V	3	V
nikl (Ni)	mg/l	<0,02	0,04	V	4	V	1	V	4	V
olovo (Pb)	mg/l	<0,001	0,05	V	5	V	1	V	5	V
antimon (Sb)	mg/l	<0,001	0,006	V	0,5	V	0,07	V	0,5	V
selen (Se)	mg/l	<0,001	0,01	V	0,7	V	0,05	V	0,7	V
zinek (Zn)	mg/l	<0,02	0,4	V	20	V	5	V	20	V

Vysvětlivky k hodnocení limitních hodnot podle vyhlášky 294/2005 Sb. :

V - vyhovuje limitní hodnotě, N - nevyhovuje limitní hodnotě

VV - vyhovuje limitní hodnotě, ale při zohlednění nejistoty měření může limitní hodnotu přesahovat

NV - nevyhovuje limitní hodnotě, ale při zohlednění nejistoty měření může limitní hodnotě vyhovovat



Příloha B (pokračování).

Labtech s.r.o.

Protokol č. : P 1520/1

Strana : 3 / 4

Výsledky slepého stanovení : VS/234/14/03

Datum provedení výluhu pro slepé stanovení: 7.3.2014

Parametr	Jednotka	Hodnoty
elektrická konduktivita	mS/m	0,37
chloridy	mg/l	<10
sirany	mg/l	<10
rozpuštěné látky	mg/l	<100
fluoridy	mg/l	<0,2
fenolový index	mg/l	<0,01
rozp. organický uhlík	mg/l	3,24
arsen	mg/l	<0,001
baryum	mg/l	<0,01
kadmium	mg/l	<0,0001
chrom	mg/l	<0,03
měď	mg/l	<0,005
molybden	mg/l	<0,001
nikl	mg/l	<0,02
olovo	mg/l	<0,001
antimon	mg/l	<0,001
selen	mg/l	<0,001
zinek	mg/l	<0,02
rtuť	mg/l	<0,0001
vzhled výluhu	-	čirý
objem vyluhovací kapaliny	ml	750
teplota výluhu	°C	22,6



Příloha B (pokračování).

Labtech s.r.o.

Protokol č. : P 1520/14

Strana : 4 / 4

Použité metody a nejistoty zkoušek

Parametr	Jednotka	Identifikace metody		Akr.	Nejistota měření
fluoridy	mg/l	SOP 10	ČSN EN ISO 10304 - 1,2	A	10%
sirany	mg/l	SOP 10	ČSN EN ISO 10304 - 1,2	A	10%
chloridy	mg/l	SOP 10	ČSN EN ISO 10304 - 1,2	A	15%
rozp. organický uhlík	mg/l	SOP 83A	ČSN EN 1484	A	5%
fenolový index	mg/l	SOP 14/1A	-	A	15%
elektrická konduktivita	mS/m	SOP 12	ČSN EN 27888	A	1%
pH	-	SOP 11	ČSN ISO 10523	A	1%
rozpuštěné látky	mg/l	SOP 25	ČSN 75 7346	A	10%
rtuť	mg/l	AAS 06-07	TNV 75 7440	A	20%
molybden	mg/l	ICP 03A	ČSN EN ISO 17294	A	20%
antimon	mg/l	ICP 03A	ČSN EN ISO 17294	A	20%
olovo	mg/l	ICP 03A	ČSN EN ISO 17294	A	20%
selen	mg/l	ICP 03A	ČSN EN ISO 17294	A	20%
arsen	mg/l	ICP 03A	ČSN EN ISO 17294	A	20%
kadmium	mg/l	ICP 03A	ČSN EN ISO 17294	A	15%
zinek	mg/l	ICP 02	ČSN EN ISO 11885	A	20%
chrom	mg/l	ICP 02	ČSN EN ISO 11885	A	20%
baryum	mg/l	ICP 02	ČSN EN ISO 11885	A	20%
nikl	mg/l	ICP 02	ČSN EN ISO 11885	A	20%
měď	mg/l	ICP 02	ČSN EN ISO 11885	A	20%
teplota výluhu	°C	SOP 93	ČSN 75 7342	A	-
sušina	%	SOP 64	ČSN EN 12880, ČL	A	1%
vzhled výluhu	-	SOPN 10	-	N	-

Nejistota měření je definována jako rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95 % s koeficientem rozšíření $k=2$ a nezahrnuje nejistotu odběru. Nejistota je vyjádřena v souladu s EA-4/16. K hodnotám výsledků pod mezi stanovitelnosti se nejistota nevztahuje.

Informace "Akr." rozlišuje akreditované (A) a neakreditované (N) standardní operační postupy (SOP). Akreditované zkoušky provedené v jiné laboratoři formou subdodávky jsou označeny (SA). Zkouška zařazená v rámci uděleného flexibilního rozsahu akreditace (FRA).

konec protokolu



Příloha C – Výsledky testu ekotoxicity strusky.



LABTECH s.r.o., Polní 23/340, 639 00 BRNO
Zkušební laboratoř Paskov
akreditovaná ČIA č. 1147



PROTOKOL O ZKOUŠCE Č. P 1521/14

Objednatel : Dalkia Česká republika, a.s.
28.října 3337/7
702 00 Ostrava, Moravská Ostrava

Číslo smlouvy :
Zhotovitel : č. 140/14
Objednatel : smlouva č. 1405-0181-Z2

Strana/celkem : 1 / 5

Akce : Zjištění vlastností strusky v TPV 4/2014

Typ vzorku : struska ze spalování uhlí
Místo odběru : Dalkia ČR, a.s., RSEM - závod Ostrava-střed, provoz Teplárna Přívoz, Křišťanova ul.,
Ostrava - Přívoz, drtiče strusky K1
Identifikace původce odpadu : Dalkia Česká republika, a.s., 28.října 3337/7, 702 00 Ostrava
Odběr provedl : objednatel
Evidenční číslo vzorku : P2847
Označení vzorku : TPV-struska K1 (ekotoxická)
kód odpadu - 10 01 01

Datum odběru vzorku : 06.04.2014 --
Datum převzetí vzorku : 17.04.2014 14:00
Datum vypracování protokolu : 12.05.2014

Ukončení odběru : --
Datum zahájení zkoušek : 22.04.2014
Protokol vypracoval : Šodková Petra

Způsob zpracování a úpravy vzorků :

Příprava vodného výluhu se řídí vyhláškou MŽP č. 294/2005 Sb. a ČSN EN 12457.

Ekotoxikologické testy - pH výluhu bylo upraveno dle vyhl. č. 294/2005Sb. na hodnotu ležící v intervalu $7,8 \pm 0,2$.

Schválil :

Ing. Věra Halvová

zástupce vedoucího Zkušební laboratoře Paskov



Prohlášení : Výsledky zkoušek a analýz se týkají pouze předmětu zkoušek a analýz a nenahrazují jiné dokumenty. Bez písemného souhlasu zkušební laboratoře se nesmí protokol reprodukovat jinak než celý.

Příloha C (pokračování).

Labtech s.r.o.

Protokol č. : P 1521/14

Strana : 2 / 5

ZÁKLADNÍ PODMÍNKY

Parametr	Jednotka	P2847
datum provedení vyluhu	-	25.4.14
pH	-	10,7
elektrická konduktivita	mS/m	28,5
vzhled vyluhu	-	čirý
hmotnost laboratorního vzorku	kg	5,0
hmotnost analytického vzorku	kg	0,075
vlhkost	%	0,27
sušina	%	99,73
objem vyluhovací kapaliny	ml	750
teplota vyluhu	°C	22,8

EKOTOXIKOLOGIE

Test toxicity	číslo vzorku: P2847	Výsledek ověřovacího testu (%)
na vodním členovci Daphnia magna		0,0
na vodním obratlovcí Poecilia reticulata		0
na zelené řase Desmodesmus subspicatus		7,4 inhibice
na semenech rostliny Sinapis alba		16,2 inhibice

Hodnocení provedených ekotestů

Číslo vzorku: P2847	Soulad s vyhláškou č.294/2005 Sb., tab. 10.2		
	Sloupec I.	Sloupec II.	Soulad s vyhláškou
na vodním členovci Daphnia magna	max. imobilizace 30%	max. imobilizace 30%	vyhovuje I. + II.
na vodním obratlovcí Poecilia reticulata	bez úhynu a změny chování	bez úhynu a změny chování	vyhovuje I. + II.
na zelené řase Desmodesmus subspicatus	max. inhibice růstu 30 %	max. změna růstu 30 %	vyhovuje I. + II.
na semenech rostliny Sinapis alba	max. inhibice růstu 30%	max. změna růstu 30 %	vyhovuje I. + II.

Pozn. Desmodesmus subspicatus nahrazuje podle ČSN EN 28692 původní název Scenedesmus subspicatus



Příloha C (pokračování).

Labtech s.r.o.

Protokol č. : P 1521/14

Strana : 3 / 5

Použité metody a nejistoty zkoušek

Parametr	Jednotka	Identifikace metody		Akr.	Nejistota měření
toxicita nefed. výluhu Desmodesmus subsp.	%	SOP 20/II	ČSN EN ISO 8692	A	-
toxicita nefed. výluhu Daphnia magna	%	SOP 20/I	ČSN EN ISO 6341	A	-
toxicita nefed. výluhu Poecilia reticulata	%	SOP 20/III	ČSN EN ISO 7346-2	A	-
toxicita nefed. výluhu Sinapis alba	%	SOP 20/IV	Met. pokyn MŽP (z 28.2.2007)	A	-
elektrická konduktivita	mS/m	SOP 12	ČSN EN 27888	A	1%
pH	-	SOP 11	ČSN ISO 10523	A	1%
teplota výluhu	°C	SOP 93	ČSN 75 7342	A	-
sušina	%	SOP 64	ČSN EN 12880, ČL	A	1%
vzhled výluhu	-	SOPN 10	-	N	-

Nejistota měření je definována jako rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95 % s koeficientem rozšíření $k=2$ a nezahrnuje nejistotu odběru. Nejistota je vyjádřena v souladu s EA-4/16. K hodnotám výsledků pod mezí stanovitelnosti se nejistota nevztahuje.

Informace "Akr." rozlišuje akreditované (A) a neakreditované (N) standardní operační postupy (SOP). Akreditované zkoušky provedené v jiné laboratoři formou subdodávky jsou označeny (SA). Zkouška zařazená v rámci uděleného flexibilního rozsahu akreditace (FRA).



Příloha C (pokračování).

Labtech s.r.o.

Protokol č. : P 1521/14

Strana : 4 / 5

Příloha : Průběh stanovení ekotoxikologických zkoušek

Test (stanovení) akutní toxicity na vodním obratlovcí rybě Poecilia reticulata

a) Test předběžný:

Číslo vzorku	počet nasazených jedinců (ks)	Mortalita				
		za 24 hod. (ks)	za 48 hod. (ks)	za 72 hod. (ks)	za 96 hod. (ks)	za 96 hod. (%)
Kontrola	3	0	0	0	0	0
P 2847	3	0	0	0	0	0

b) Test ověřovací:

Číslo vzorku	počet nasazených jedinců (ks)	Mortalita				
		za 24 hod. (ks)	za 48 hod. (ks)	za 72 hod. (ks)	za 96 hod. (ks)	za 96 hod. (%)
Kontrola	10	0	0	0	0	0
P 2847	30	0	0	0	0	0

Test (stanovení) akutní toxicity na vodním koryši perloočce Daphnia magna

a) Test předběžný:

Číslo vzorku	počet nasazených jedinců (ks)	Mortalita		
		za 24 hod. (ks)	za 48 hod. (ks)	za 48 hod. (%)
Kontrola	10	0	0	0
P 2847	10	0	0	0

b) Test ověřovací:

Číslo vzorku	počet nasazených jedinců (ks)	Mortalita		
		za 24 hod. (ks)	za 48 hod. (ks)	za 48 hod. (%)
Kontrola	20	0	0	0
P 2847	60	0	0	0,0



Příloha C (pokračování).

Labtech s.r.o.

Protokol č. : P 1521/14

Strana : 5 / 5

Test (zkouška inhibice růstu ~~sladkovodních zelených řas~~) akutní toxicity na ~~sladkovodní řase~~
Desmodesmus subspicatus

a) Test předběžný:

Číslo vzorku	hustota řasové kultury				Průměrná inhibice růstu řasy Ipi(%)	Průměrná stimulace růstu řasy Ipi(%)
	počet buněk v 1 ml roztoku na začátku testu *	počet buněk v 1 ml roztoku v průběhu testu *				
		24 hod.	48 hod.	72 hod.		
Kontrola	10000	77000	183000	750000	-	-
P 2847	10000	56000	147000	510000	8,9	-

* průměrná hodnota paralelního stanovení

b) Test ověřovací:

Číslo vzorku	hustota řasové kultury				Průměrná inhibice růstu řasy Ipi(%)	Průměrná stimulace růstu řasy Ipi(%)
	počet buněk v 1 ml roztoku na začátku testu *	počet buněk v 1 ml roztoku v průběhu testu *				
		24 hod.	48 hod.	72 hod.		
Kontrola	10000	79000	193000	790000	-	-
P 2847	10000	52000	165000	580000	7,1	-

* průměrná hodnota paralelního stanovení

Stanovení (test inhibice růstu kořene Hořčice bílé Sinapis alba) akutní toxicity na semenech rostliny Sinapis alba

a) Test předběžný:

Číslo vzorku	průměrná délka kořene (mm) za 72 hod.	průměrná inhibice růstu kořene (%) za 72 hod.	průměrná stimulace růstu kořene (%) za 72 hod.
Kontrola	25,6	-	-
P 2847	21,5	16,0	-

b) Test ověřovací:

Číslo vzorku	průměrná délka kořene (mm) za 72 hod.	průměrná inhibice růstu kořene (%) za 72 hod.	průměrná stimulace růstu kořene (%) za 72 hod.
Kontrola	29,0	-	-
P 2847	24,3	16,2	-

konec protokolu



Příloha D – Výsledky analýzy sušiny strusky.



LABTECH s.r.o., Polní 23/340, 639 00 BRNO
Zkušební laboratoř Paskov
akreditovaná ČIA č. 1147



L 114

PROTOKOL O ZKOUŠCE Č. P 1522/14

Objednatel : Dalkia Česká republika, a.s.
28.října 3337/7
702 00 Ostrava, Moravská Ostrava

Číslo smlouvy :
Zhotovitel : č. 140/14
Objednatel : smlouva č.1405-0181-Z2

Strana/celkem : 1 / 2

Akce : Zjištění vlastností strusky v TPV 4/2014

Typ vzorku : struska ze spalování uhlí
Místo odběru : Dalkia ČR, a.s., RSEMI - závod Ostrava-střed, provoz Teplárna Přívoz, Křišťanova ul.,
Ostrava - Přívoz, drtiče strusky K1
Identifikace původce odpadu : Dalkia Česká republika, a.s., 28.října 3337/7, 702 00 Ostrava
Odběr provedl : objednatel
Evidenční číslo vzorku : P2848
Označení vzorku : TPV-struska K1 (sušina)
Kód odpadu - 10 01 01

Datum odběru vzorku : 06.04.2014 --
Datum převzetí vzorku : 17.04.2014 14:00
Datum vypracování protokolu : 12.05.2014

Ukončení odběru : --
Datum zahájení zkoušek : 22.04.2014
Protokol vypracoval : Šodková Petra

Způsob zpracování a úpravy vzorků :

Výsledky jsou přepočteny na obsah sušiny při 105°C.

Stanovení kovů - přibližně 2 g vzorku se rozp. ve směsi HNO₃ a HCl na topné desce.

Schválil :

Ing. Věra Halvová

zástupce vedoucího Zkušební laboratoře Paskov



Prohlášení : Výsledky zkoušek a analýz se týkají pouze předmětu zkoušek a analýz a nenahrazují jiné dokumenty. Bez písemného souhlasu zkušební laboratoře se nesmí protokol reprodukovat jinak než celý.

Příloha D (pokračování).

Labtech s.r.o.

Protokol č. : P 1522/14

Strana : 2 / 2

ANALÝZA SUŠINY

Parametr	Jednotka	P2848 TPV-struska K1	Limitní hodnoty dle vyhl. č. 294/2005 Sb. Tabulka č. 10.1	
rtuť (Hg)	mg/kg	0,003	max. 0,8	V
suma BTEX	mg/kg	<0,1	max. 0,4	V
suma PAU	mg/kg	0,022	max. 6	V
uhlovodíky C10-C40	mg/kg	<10	max. 3000	V
suma PCB	mg/kg	<0,0002	max. 0,2	V
EOX	mg/kg	<0,5	max. 1	V
arsen (As)	mg/kg	<0,5	max. 10	V
kadmium (Cd)	mg/kg	0,056	max. 1	V
chrom (Cr)	mg/kg	12,9	max. 200	V
nikl (Ni)	mg/kg	9,29	max. 80	V
olovo (Pb)	mg/kg	<2,5	max. 100	V
vanad (V)	mg/kg	12,7	max. 180	V
sušina	%	99,73		

Vysvětlivky k hodnocení limitních hodnot podle vyhlášky 294/2005 Sb. :

V - vyhovuje limitní hodnotě, N - nevyhovuje limitní hodnotě

VV - vyhovuje limitní hodnotě, ale při zohlednění nejistoty měření může limitní hodnotu přesahovat

NV - nevyhovuje limitní hodnotě, ale při zohlednění nejistoty měření může limitní hodnotě vyhovovat

Použité metody a nejistoty zkoušek

Parametr	Jednotka	Identifikace metody		Akr.	Nejistota měření
EOX	mg/kg	ECH 08	DIN 38 414-S17	A	40%
rtuť	mg/kg	AAS 06-07	ČSN 75 7440	A	20%
kadmium	mg/kg	ICP 03B	ČSN EN ISO 17294	A	20%
arsen	mg/kg	ICP 03B	ČSN EN ISO 17294	A	20%
vanad	mg/kg	ICP 04A	ČSN EN ISO 11885	A	20%
olovo	mg/kg	ICP 04A	ČSN EN ISO 11885	A	20%
chrom	mg/kg	ICP 04A	ČSN EN ISO 11885	A	20%
nikl	mg/kg	ICP 04A	ČSN EN ISO 11885	A	20%
uhlovodíky C10-C40	mg/kg	SOP 94A	ČSN EN ISO 9377-2	A	20 %
sušina	%	SOP 64	ČSN EN 12880, ČL	A	1%
suma BTEX	mg/kg	SOP 18/B	Výpočet sumy BTEX	A	20%
suma PAU	mg/kg	SOP 17/B	Výpočet sumy PAU	A	20%
suma PCB	mg/kg	SOP 16/B	Výpočet sumy PCB	A	20%

Nejistota měření je definována jako rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95 % s koeficientem rozšíření $k=2$ a nezahrnuje nejistotu odběru. Nejistota je vyjádřena v souladu s EA-4/16. K hodnotám výsledků pod mezi stanovitelnosti se nejistota nevztahuje.

Informace "Akr." rozlišuje akreditované (A) a neakreditované (N) standardní operační postupy (SOP). Akreditované zkoušky provedené v jiné laboratoři formou subdodávky jsou označeny (SA). Zkouška zařazená v rámci uděleného flexibilního rozsahu akreditace (FRA).

